

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ สมบัติเชิงกลและการยับยั้ง
เชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์
คอมโพสิต

PREPARATION, CHARACTERIZATION, MECHANICAL
AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF NATURAL
RUBBER/SULPHUR/GRAPHENE OXIDE
COMPOSITE SHEETS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมีคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION, CHARACTERIZATION, MECHANICAL
AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF NATURAL
RUBBER/SULPHUR/GRAPHENE OXIDE
COMPOSITE SHEETS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ สมบัติเชิงกลและการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย
ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ คอมโพสิต

Preparation, characterization, mechanical and antibacterial
properties of natural rubber/sulphur/graphene oxide
composite sheets

ชื่อนักศึกษา นางสาวธัญวรัตน์ หอมจันทร์ รหัสนักศึกษา 58050483
นายพีรณัฐ เลิศธีรธร รหัสนักศึกษา 58050522


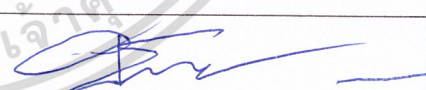
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ประธานกรรมการ	
ดร.นภยา หมีนแดง กรรมการ	นภยา หมีนแดง
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้สิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในการนำใบนี้ไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ สมบัติเชิงกล และการยับยั้ง เชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ คอมโพสิต
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธัญวรัตน์ หอมจันทร์ รหัสนักศึกษา 58050483 นายพีรณัฐ เลิศธีรธร รหัสนักศึกษา 58050522
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของยางธรรมชาติผสมกับซัลเฟอร์คอมโพสิต (NR/S) และยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์คอมโพสิต (NR/S/GO) แผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตทั้งหมดถูกเตรียมโดยกระบวนการผสมอย่างง่ายระหว่างน้ำยางธรรมชาติ, ซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ (GO) ที่ปริมาณต่าง ๆ (1, 3, 5 และ 7 มิลลิลิตร) ภายใต้การบั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง (RT) เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเทขึ้นรูปลงในแม่แบบพลาสติกแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เตรียมได้จะถูกตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิคต่าง ๆ เช่น การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible) พูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) รามานสเปกโตรสโคปี (Raman) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TGA) จากการวิเคราะห์พบว่าวัสดุที่เป็นผลึกและหมู่ฟังก์ชันของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตทั้งหมดสอดคล้องกับยางธรรมชาติและอนุภาคของซัลเฟอร์ ในขณะที่เทคนิครามานยืนยันได้ว่าพบซัลเฟอร์และอนุภาคของกราฟีนออกไซด์ในเมทริกซ์ของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตทั้งหมด จากเทคนิค SEM และ EDS แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคของซัลเฟอร์มีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติมากยิ่งขึ้น จากการทดสอบแรงดึงพบว่าค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus), ความแข็งแรง (Stiffness), ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) และค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบกับแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์ทั้งหมดสงวนไว้โดยคณะผู้จัดทำเอกสารฉบับนี้

ยางธรรมชาติพบว่าสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อน (Annealing) ที่ 100 °C สูงกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตทุกประเภทโดยใช้วิธี agar disc diffusion ซึ่งทดสอบกับแบคทีเรียแกรมบวก (*S. Aureus*) และแกรมลบ (*E. Coli*) ตามลำดับ โดยจากผลการวิเคราะห์พบว่าแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตมีสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ค่อนข้างดีกับ *S. Aureus* เท่านั้น และพบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตทั้งหมดลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณกราฟีนออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ : กระบวนการผสมและเทขึ้นรูปแบบลาเท็กซ์ กราฟีนออกไซด์ น้ำยางธรรมชาติ แผ่นยางธรรมชาติ สมบัติเชิงกล อนุภาคซิลเฟอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Preparation, characterization, mechanical and antibacterial properties of natural rubber/sulphur/graphene oxide composite sheets
Students	Miss Thanwarat Homchan Student ID 58050483 Mr. Peeranut Lertteeratom Student ID 58050522
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	Year 2018
Advisor	Dr. Chaval Sriwong

Abstract

The objective of this special project was to study the improvements of mechanical and antibacterial properties of natural rubber (NR) mixed with sulphur (NR/S) and sulphur-graphene oxide (NR/S/GO) composite sheets. In the preparation, all NR composite sheet samples were prepared by a conventional direct mixing of natural rubber latex and sulphur suspension with the various amounts of GO loading (1, 3, 5 and 7 mL) under stirring at room temperature (RT) for 10 min. Then, the mixtures were casted into plastic mold, left to dryness at RT for 24 h. After that, all as-prepared samples were characterized and confirmed by a several techniques, such as, XRD, UV-vis, FTIR, Raman, SEM, EDS and TGA. The results showed that the crystalline phase and functional groups of all NR composite sheets are corresponding to pristine natural rubber and sulphur particles. While Raman spectra confirmed that the sulphur and GO particles exist into the matrix of all NR composite sheets. SEM and EDS results indicated that the sulphur particles were well-dispersed into the matrix of natural rubber upon the increasing of GO loading. From the tensile test, the Young's modulus, stiffness, stress at maximum load and load at break values were increased with the increasing of GO loading. Compared with NR sheet, the mechanical properties of all NR composite sheets had higher than pristine NR sheet sample both with and without annealing at 100 °C. Moreover, the antibacterial properties of all

NR sheet, NR/S and NR/S/GO composites samples were investigated using an agar disc diffuse method against Gram-positive bacterial (*S. Aureus*) and Gram-negative (*E. Coli*), respectively. The results implied that all NR composite samples exhibited a fairly-good antibacterial against the *S. Aureus* only. The antibacterial performances of all NR composite sheet samples were slightly decreased with increasing of GO loading.

Keywords : Latex mixing-casting process, Graphene oxide (GO), Natural rubber latex, Natural rubber (NR) sheet, Mechanical property, Sulphur particles



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการให้ความช่วยเหลือแนะนำของ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้ ที่ได้กรุณาที่ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นตรวจสอบและแก้ไขร่างโครงการพิเศษมาโดยตลอด จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธาน โดยมี ดร.นารถา หมั่นแดง เป็นกรรมการในการสอบโครงการพิเศษ ซึ่งได้กรุณาตรวจแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาคเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้านการใช้อุปกรณ์และสารเคมี การใช้เครื่องมือต่าง ๆ รวมไปถึงด้านอำนวยความสะดวกและการประสานงาน

ขอขอบพระคุณพี่ๆ ระดับปริญญาตรีบัณฑิตและปริญญามหาบัณฑิต เพื่อนๆ ที่ให้ความรู้คำแนะนำต่าง ๆ ในการดำเนินงานโครงการพิเศษ ให้ผู้เขียนตลอดมาตลอดจนสามารถดำเนินโครงการพิเศษนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนผู้เขียนงานวิจัยและบทความต่าง ๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้เขียนจนสามารถให้โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ธัญวรัตน์ หอมจันทร์

พีรณัฐ เลิศธีรธร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ณ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ.....	4
2.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	4
2.1.1.1 ส่วนที่เป็นเนื้อยาง	5
2.1.1.2 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง	6
2.1.2 รูปแบบของยางธรรมชาติ.....	7
2.1.3 โครงสร้างของยางธรรมชาติ	8
2.1.4 สมบัติของยางธรรมชาติ	8
2.1.5 สารเคมีสำหรับยาง.....	10
2.2 ซัลเฟอร์	12
2.2.1 อัญรูปของซัลเฟอร์.....	14
2.2.2 การนำไปใช้งาน.....	15
2.3 กราฟีนออกไซด์	16
2.3.1 สมบัติของกราฟีนออกไซด์	16
2.3.2 การนำไปใช้งาน.....	17
2.3.3 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์.....	18
2.4 เชื้อแบคทีเรีย.....	21
2.4.1 ชนิดของแบคทีเรีย	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดแบบสงวนเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 โครงสร้างของเซลล์แบคทีเรีย.....	22
2.4.3 ความแตกต่างของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ	23
2.5 กลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์	25
2.6 การบออ่อน.....	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี.....	31
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	31
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	32
3.3.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์	32
3.3.1.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการของฮัมเมอร์.....	32
3.3.1.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง.....	33
3.3.2 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต	34
3.3.3 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตเพื่อศึกษาผลของ การบออ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	35
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์	37
3.4.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer ; XRD)....	37
3.4.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared; FT-IR).....	37
3.4.3 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectrometer)	37
3.4.4 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrometer).....	37
3.4.5 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Gravity Analysis; TGA).....	38
3.4.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM).....	38
3.4.7 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer ; EDS)	38
3.4.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy ; TEM)	39
3.4.9 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine; UTM)	39
3.4.10 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-Bacterial test).....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์กราฟีนออกไซด์.....	41
4.1.1 ผลการตรวจสอบผลึกและอสัณฐาน	41
4.1.2 ผลการตรวจสอบการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต-แสงขาว	42
4.1.3 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล	43
4.1.4 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน	44
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานในระดับจุลภาค.....	45
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต	46
4.2.1 ผลการตรวจสอบผลึกและอสัณฐาน	46
4.2.2 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล	48
4.2.3 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน	49
4.2.4 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์การดูดกลืนแสง.....	52
4.2.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานในระดับจุลภาค	53
4.2.5.1 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติ	53
4.2.5.2 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต	54
4.2.5.3 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต ...	54
4.2.5.4 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ คอมโพสิต	55
4.2.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ.....	58
4.2.6.1 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ.....	58
4.2.6.2 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ คอมโพสิต	59
4.2.6.3 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต...	60
4.2.6.4 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก คอมโพสิต	61
4.2.6.5 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก คอมโพสิต	62
4.2.6.6 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนัก คอมโพสิต.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำเพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.6.7 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก คอมโพสิต	64
4.2.7 ผลการวิเคราะห์เทคนิคเชิงความร้อน (TGA).....	65
4.2.8 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	68
4.2.9 ผลการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย.....	80
4.2.9.1 ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก.....	81
4.2.9.2 ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	85
5.1.1 สรุปผลของสารตัวเติมกราฟีนออกไซด์และซัลเฟอร์	85
5.1.2 สรุปผลของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต และการอบอ่อน.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	87
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก.....	95
ภาคผนวก ข.....	98
ภาคผนวก ค.....	99
ภาคผนวก ง.....	102
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	4
2.2 ส่วนประกอบของเนื้อยางแห้ง	6
2.3 สมบัติทั่วไปของซัลเฟอร์.....	12
2.4 สมบัติทางกายภาพของซัลเฟอร์	12
2.5 สมบัติของอะตอมซัลเฟอร์.....	13
2.6 สมบัติอื่น ๆ ของซัลเฟอร์.....	13
2.7 ความแตกต่างระหว่างแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ	23
3.1 แสดงเงื่อนไขในการขึ้นรูปแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต	34
3.2 แสดงเงื่อนไขในการอบอ่อนแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	36
4.1 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรดของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต.....	49
4.2 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตชนิดต่าง ๆ.....	67
4.3 แสดงค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	72
4.4 แสดงค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	76
4.5 แสดงค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่อัตราส่วนต่าง ๆ อบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	80
4.6 แสดงผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยการวัดรัศมีโซนยับยั้ง (Inhibition Zone).....	83
ข.1 รูปแผ่นยางธรรมชาติ, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต, แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีน-ออกไซด์คอมโพสิตและแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต	99
ข.2 รูปแผ่นยางธรรมชาติ, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต, แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีน-ออกไซด์คอมโพสิตและแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงโครงสร้างกราฟาไฟต์ กราไฟต์ออกไซด์และกราฟีนออกไซด์.....	2
2.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	4
2.2 แสดงอนุภาคของยางธรรมชาติ	5
2.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของซัลเฟอร์	12
2.4 แสดงแผนผังอัญรูปต่าง ๆ ของซัลเฟอร์.....	14
2.5 แสดงอัญรูปของกำมะถันที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ.....	14
2.6 แสดงโครงผลึกของซัลเฟอร์แบบอโรมบิกและมอนอคลินิก.....	15
2.7 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของกราฟีนออกไซด์	16
2.8 แสดงกลไกการผลิตกราฟีนออกไซด์ 3 รูปแบบ.....	19
2.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการทัวร์กับวิธีการฮัมเมอร์	20
2.10 แสดงโครงสร้างของเซลล์แบคทีเรีย.....	22
2.11 แสดงความแตกต่างของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ.....	24
2.12 แสดงกลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของวัสดุผสมกราฟีน	26
2.13 แสดงโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่	27
2.14 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเทอร์โมพลาสติก	28
3.1 สารแขวนลอยกราฟาไฟต์ออกไซด์.....	33
3.2 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์.....	34
3.3 แสดงลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต ที่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง	35
3.4 แสดงลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตหลังการอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	36
4.1 XRD Pattern ของกราฟาไฟต์ (Graphite) และกราฟีนออกไซด์ (GO).....	42
4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO) และสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์.....	42
4.3 แสดงกราฟ FT-IR ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์.....	43
4.4 แสดงสเปกตรัมของเทคนิครามานเปรียบเทียบระหว่างกราฟาไฟต์และกราฟีนออกไซด์ (GO) .	44
4.5 แสดงภาพจากกล้อง (a) SEM ที่กำลังขยาย 3000X ของผงกราฟาไฟต์ (b) SEM ที่กำลังขยาย 3000X ของผงกราฟีนออกไซด์ และ (c) TEM ของกราฟีนออกไซด์.....	45
4.6 XRD Pattern ของ (a) NR (b) Sulphur (S ₈) Standard (c) NR/S (d) NR/GO_1.58 wt% (e) NR/S/GO_1.58 wt%.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 XRD Pattern ของ (a) NR (b) NR/S/GO_0.34 wt% (c) NR/S/GO_0.68 wt% (d) NR/S/GO_1.13 wt% และ (e) NR/S/GO_1.58 wt%.....	47
4.8 แสดงกราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) NR (b) NR/S (c) NR/GO_1.58 wt% (d) NR/S/GO_1.58 0.34 wt% และ (e) NR/S/GO_1.58 wt%	48
4.9 แสดงสเปกตรัมของเทคนิครามานเปรียบเทียบ (a) NR (b) NR/S (c) GO (d) NR/GO_1.58 wt% (e) NR/S/GO_1.58 wt%	49
4.10 แสดงสเปกตรัมของเทคนิครามานเปรียบเทียบ (a) GO (b) NR/S/GO_0.34 wt% (c) NR/S/GO_0.68 wt% (d) NR/S/GO_1.13 wt% (e) NR/S/GO_1.58 wt%	50
4.11 แสดงสเปกตรัมของเทคนิครามานเปรียบเทียบระหว่าง (a) NR/S/GO_0.34 wt% (ด้านบน) (b) NR/S/GO_0.34 wt% (ด้านล่าง).....	51
4.12 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย 250X เท่า และแสดงภาพขยายบริเวณขอบด้านล่างของ NR/S/GO_0.34 wt%	51
4.13 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเปรียบเทียบ (a) NR (b) NR/S (c) NR/GO_1.58 wt% (d) NR/S/GO_0.34 wt% (e) NR/S/GO_0.68 wt% (f) NR/S/GO_1.13 wt% (g) NR/S/GO_1.58 wt%	52
4.14 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของ NR กำลังขยาย (a) 250X (b) 500X (c) 1000X	53
4.15 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของ NR/S กำลังขยาย (a) 250X (b) 500X (c) 1000X	54
4.16 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของ NR/GO_1.58 wt% กำลังขยาย (a) 250X (b) 500X (c) 1000X	55
4.17 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย (I) 250X (II) 500X (III) 1000X ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟออร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต (a) NR/S/GO_0.34 wt% (b) NR/S/GO_0.68 wt% (c) NR/S/GO_1.13 wt% (d) NR/S/GO_1.58 wt%.....	57
4.18 แสดง EDS sprectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน และ (b) ธาตุออกซิเจน.....	58
4.19 แสดง EDS sprectrum และองค์ประกอบของธาตุใน NR และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน และ (b) ธาตุออกซิเจน.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 แสดง EDS sprectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจน และ (c) ธาตุซิลเฟอร์.....	60
4.21 แสดง EDS sprectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S/GO_0.34 wt% และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจน และ (c) ธาตุซิลเฟอร์.....	61
4.22 แสดง EDS sprectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S/GO_0.68 wt% และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจน และ (c) ธาตุซิลเฟอร์.....	62
4.23 แสดง EDS sprectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S/GO_1.13 wt% และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจน และ (c) ธาตุซิลเฟอร์.....	63
4.24 แสดง EDS sprectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S/GO_1.58 wt% และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจน และ (c) ธาตุซิลเฟอร์.....	64
4.25 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของสารตัวอย่าง.....	66
4.26 (a) แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของสารตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิของการเริ่มต้นสลายตัวและ (b) แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของสารตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิของการสิ้นสุดสลายตัว.....	66
4.27 แสดงกราฟ Tensile Strength ของ NR, NR/S, NR/S/GO_0.34 wt%, NR/S/GO_0.68 wt%, NR/S/GO_1.13 wt% และ NR/S/GO_1.58 wt%.....	69
4.28 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum Load ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตผสมประเภทต่าง ๆ.....	70
4.29 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	70
4.30 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	71
4.31 แสดงการเปรียบเทียบ Load at break ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	71
4.32 แสดงกราฟ Tensile Strength ของ NR, NR/S, NR/S/GO_0.34 wt%, NR/S/GO_1.58 wt% และ NR/GO_1.58 wt%.....	73
4.33 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum Load ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	74
4.34 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

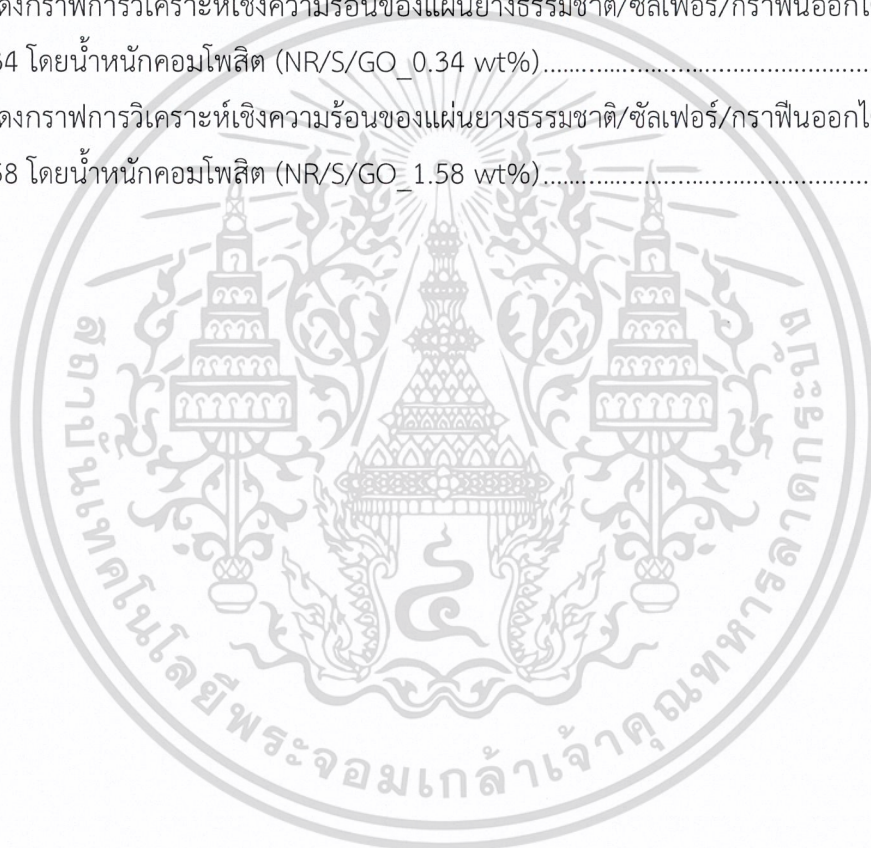
รูปที่	หน้า
4.35 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	75
4.36 แสดงการเปรียบเทียบ Load at break ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	75
4.37 แสดงกราฟ Tensile Strength ของ NR, NR/S, NR/S/GO_1.58 wt%, NR/GO_1.58 wt%, NR 100 °C 4 Hr., NR/S 100 °C 4 Hr., NR/S/GO_1.58 wt% 100 °C 4 Hr. และ NR/GO_1.58 wt% 100 °C 4 Hr.	77
4.38 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum Load ของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	78
4.39 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	78
4.40 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	79
4.41 แสดงการเปรียบเทียบ Load at break ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ.....	79
4.42 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต 6 ประเภท ได้แก่ A) NR Pure, B) NR/S, C) NR/S/GO 0.34 wt%, D) NR/S/GO 1.13 wt%, E) NR/S/GO 1.58 wt% และ F) NR/GO 1.58 wt%.....	81
4.43 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต 6 ประเภท ได้แก่ A) NR Pure, B) NR/S, C) NR/S/GO_0.34 wt%, D) NR/S/GO_1.13 wt%, E) NR/S/GO_1.58 wt% และ F) NR/GO_1.58 wt%.....	82
4.44 กราฟแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (S.aureus) โดยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ	83
ค.1 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR).....	100
ค.2 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์คอมโพสิต (NR/S).....	100
ค.3 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/GO_1.58 wt%).....	101
ค.4 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_0.34 wt%).....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นไปเซปรีเยชันด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.5 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก คอมโพสิต (NR/S/GO_1.58 wt%)	102
ง.1 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ (NR)	103
ง.2 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต (NR/S)..	103
ง.3 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักคอมโพสิต (NR/GO_1.58 wt%).....	104
ง.4 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนักคอมโพสิต (NR/S/GO_0.34 wt%).....	104
ง.5 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักคอมโพสิต (NR/S/GO_1.58 wt%).....	105



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
NR	ยางธรรมชาติ
S	ซัลเฟอร์หรือกำมะถัน
GO	กราฟีนออกไซด์
NR/S	แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์
NR/GO_1.58 wt%	แผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก
NR/S/GO_0.34 wt%	แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก
NR/S/GO_0.68 wt%	แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก
NR/S/GO_1.13 wt%	แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนัก
NR/S/GO_1.58 wt%	แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางธรรมชาติ (Natural rubber) ถือว่าเป็นวัตถุดิบที่สำคัญของโลกเนื่องจากนำไปผลิตเป็นของใช้ในชีวิตประจำวันได้หลากหลาย แต่ในปัจจุบันราคาน้ำยางธรรมชาติในประเทศไทยตกต่ำลงอย่างมาก เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติให้สูงขึ้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้ดียิ่งขึ้นโดยการเติมสารตัวเติมเพื่อเพิ่มสมบัติของแผ่นยาง ไม่ว่าจะเป็นสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีความหลากหลายในการนำยางธรรมชาติมาใช้งานมากยิ่งขึ้น [1-2]

น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น เป็นสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ประกอบไปด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ มีเนื้อยางอยู่ประมาณ 30-40% แต่จะนำมาปั่นเหวี่ยงจนน้ำยางแห้งขึ้นจนมีปริมาณเนื้อยางอยู่ 60% โดยจะต้องเติมแอมโมเนียเพื่อรักษาเสถียรภาพของน้ำยางด้วย มีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-Polyisoprene) ใน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบเส้นตรง ใน 1 หน่วยไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และหมู่อัลฟาเมทิลีนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ยางธรรมชาติมีสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน เช่น ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่อการขีดถู ความเหนียวติดกัน เป็นต้น แต่ก็ยังมีข้อด้อยอยู่ เช่น มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ต่ำ ฉีกขาดได้ง่าย ถูกรอยขีดข่วนได้ง่าย ขึ้นเชื้อราเจริญเติบโตได้ง่ายและเสียสภาพจากเชื้อราหรือเชื้อแบคทีเรียได้ง่าย [3] จึงส่งผลทำให้คุณภาพของยางธรรมชาติและการนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างจำกัดดังนั้นจึงมีการการพัฒนาหรือแก้ไขจุดบกพร่องดังกล่าวด้วยการเติมสารเคมีบางประเภท เช่น สารทำให้ยางคงรูปคือซัลเฟอร์ (Sulphur) สารเสริมแรงซึ่งเป็นพวกอนุพันธ์ของคาร์บอน ตัวอย่างเช่น คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ท่อนาโนของคาร์บอน (Carbon nanotube) กราฟีน (Graphene) กราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ซึ่งเป็นอนุรูปหนึ่งของคาร์บอน มาเป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้นในอนาคต [4-5]

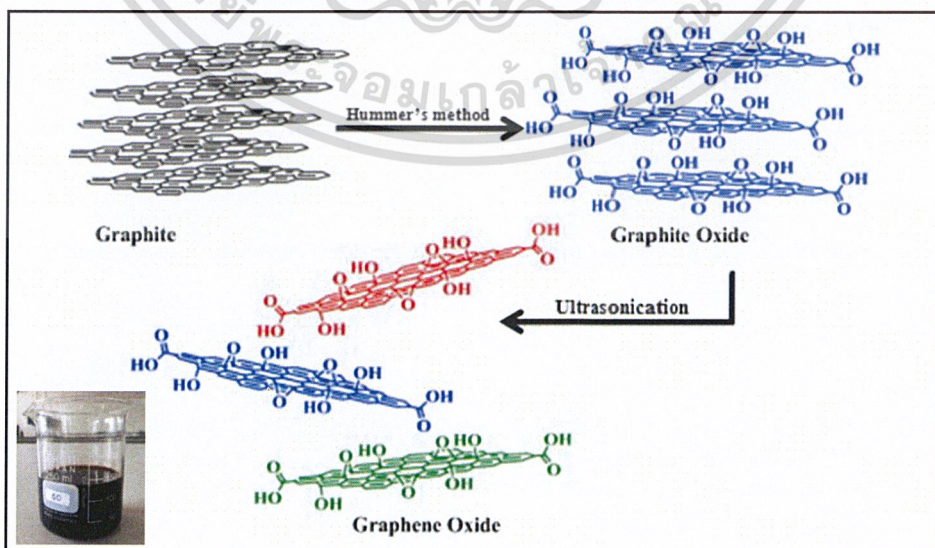
กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) เป็นแผ่นโมเลกุลของกราฟไฟต์ออกไซด์เป็นสารประกอบของคาร์บอน ออกซิเจนและไฮโดรเจน เป็นโครงข่ายคาร์บอน 2 มิติ อะตอมของคาร์บอนเรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม ชั้นกราฟีนออกไซด์มีความหนาประมาณ 1.1 ± 0.2 นาโนเมตร มีหมู่ฟังก์ชันเกาะอยู่ที่แผ่น ข้อดีของกราฟีนออกไซด์คือ กราฟีนออกไซด์เป็นฉนวนไฟฟ้าและฉนวนความร้อน มีความแข็งแรงเชิงกลสูงมาก มีค่ามอดูลัสของยังสูง มีความยืดหยุ่นสูงรวมทั้งมีการกระจายตัวง่ายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วอื่น ๆ เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันเกาะอยู่มากมายซึ่งจะช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการผสมกราฟีนออกไซด์เข้ากับวัสดุเซรามิกและพอลิเมอร์ได้ง่าย จึงช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุได้อย่างดีโดยเฉพาะสมบัติเชิงกลของวัสดุ [6]

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติเมื่อจะผ่านกระบวนการการอบอ่อน (Annealing process) เพื่อกำจัดความเหนียวติด (Tackiness) ของยางธรรมชาติและเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ โดยการอบอ่อนเป็นกระบวนการช่วยในการจัดเรียงสายโซ่ของโมเลกุลยางธรรมชาติให้มีความเป็นระเบียบขึ้นอีกทั้งกระบวนการอบอ่อนนี้ยังช่วยเชื่อมโมเลกุลยางแต่ละโมเลกุลผ่านพันธะโควาเลนต์ให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายได้เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างสายโซ่ของยางธรรมชาติจะทำปฏิกิริยากับกำมะถันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่น ทนทานและไม่เหนียวติด โดยกระบวนการการอบอ่อนที่อุณหภูมิห้องจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ ซึ่งอาจต้องใช้เวลามากหลายวันในการทำให้การอบอ่อนเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการอบอ่อนลงเราสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนให้สูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิปกติที่ใช้ในการอบอ่อนผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติจะอยู่ที่ประมาณ 100°C โดยใช้ตู้อบ (Oven) ซึ่งสามารถใช้ในการทำให้แห้งที่อุณหภูมิสูงได้ด้วยการอบอ่อนโดยใช้ตู้อบพลังงานความร้อน ข้อดีของการอบอ่อนด้วยตู้อบ คือ ง่ายและอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูก ส่วนข้อเสียของการอบอ่อนแบบนี้คือ การเกิดออกซิเดชันที่ผิวของแผ่นยางธรรมชาติ ในบางครั้งจะเกิดฟองอากาศขึ้นระหว่างการอบอ่อน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการอบที่ไม่เหมาะสม มีก๊าซเกิดขึ้น การเกิดรูพรุนที่ผิวหรือใช้อุณหภูมิที่สูงมากเกินไปโดยการอบอ่อนหลังจากการอบแห้งสามารถช่วยหลีกเลี่ยงสิ่งเหล่านี้ได้ [7]

ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นยางธรรมชาติผสม ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการเติมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ลงไปเป็นปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งน่าจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนรวมถึงสมบัติการยั้งยั้งเชื้อแบคทีเรียและยังได้ทำการศึกษาผลการอบอ่อนต่อคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตนี้รวมถึงศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตนี้โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 1.1 ภาพแสดงโครงสร้างกราฟไฟต์ กราไฟต์ออกไซด์ และกราฟีนออกไซด์ [8]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและเตรียมแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต
- 2) ศึกษาผลของปริมาณการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติคอมโพสิต
- 3) ศึกษาผลของการอบอ่อน (Annealing) ต่อแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เตรียมได้
- 4) การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ และสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เตรียมได้
- 5) ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เตรียมได้
- 6) เพื่อศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของของยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมโดยกระบวนการผสมและเทขึ้นรูปโดยตรง (Direct latex mixing casting method) ผสมน้ำยางธรรมชาติ สารแขวนลอยซัลเฟอร์ และสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์
- 2) ทำการศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต โดยศึกษาผลของการเติมกราฟีนออกไซด์ในความเข้มข้นต่าง ๆ คือ 0.34 wt%, 0.68 wt%, 1.13wt% และ 1.58 wt% ตามลำดับ
- 3) ศึกษาผลการอบอ่อน โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 4) เพื่อทำการศึกษาพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FT-IR), Raman spectroscopy, Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), UV-Visible Spectroscopy และ Thermal Gravity Analysis (TGA) เป็นต้น
- 5) ศึกษาสมบัติเชิงกลวัดการทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)
- 6) ศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตด้วยวิธี Agar disc diffusion โดยทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* (*E.coli*) เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

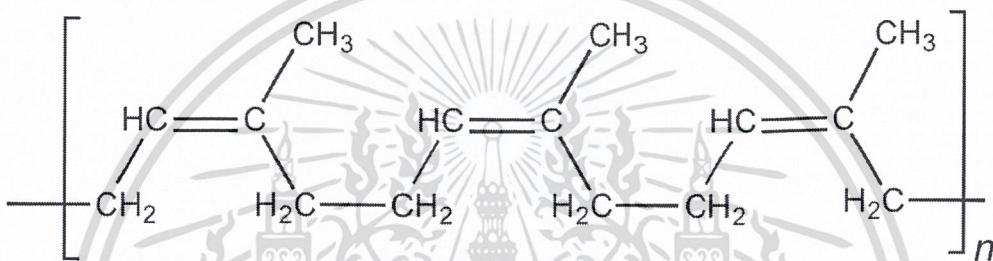
- 1) ได้รับองค์ความรู้ต่าง ๆ ในการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต และมีความเข้าใจถึงการเตรียมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์
- 2) ได้รับองค์ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติและลักษณะเฉพาะของกราฟีนออกไซด์
- 3) ได้รับองค์ความรู้และมีความเข้าใจเกี่ยวกับการนำกราฟีนออกไซด์ไปใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติของยางธรรมชาติ นำไปสู่การพัฒนาสมบัติยางธรรมชาติต่อไป
- 4) เพิ่มมูลค่าของน้ำยางธรรมชาติโดยเตรียมเป็นแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตด้วยวิธีการง่าย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสาร

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้จากต้นพืชในสกุล *Hevea brasiliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มน้ำอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีสูตรทางเคมีคือ C_5H_8 มีชื่อเรียกว่า ไอโซพรีน (Isoprene) และมีการจัดเรียงตัวโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นแบบ Cis-1,4-Polyisoprene มีสูตรโครงสร้าง แสดงดังภาพที่ 2.1 [9]



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [9]

2.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ [10]

ส่วนประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	36
เนื้อยางแห้ง	33
โปรตีน	1 - 1.5
เรซิน	1 - 2.5
เถ้า	0 - 1
น้ำตาล	1
น้ำ (ในปริมาณที่ร่วมกับสารอื่น)	25 - 28

น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำ (emulsion) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสภาพเป็นคอลลอยด์ มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 30-40 pH 6.5-7

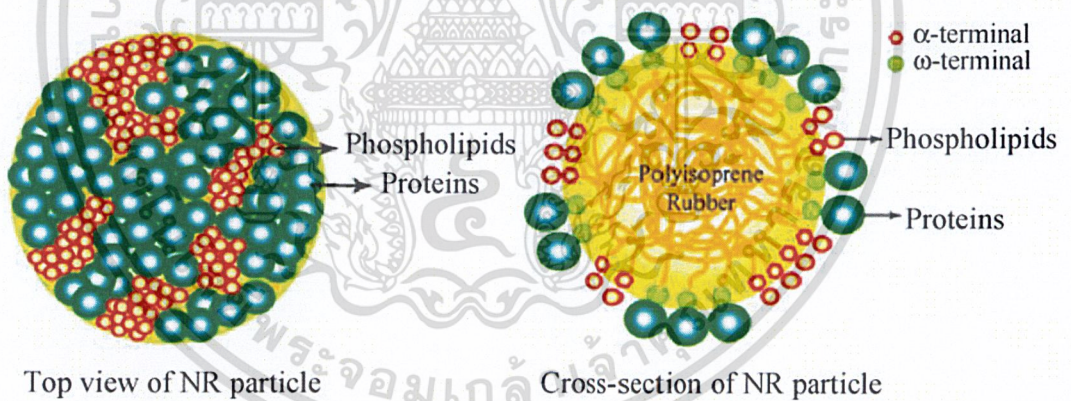
น้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผูกมัดให้เข้าระบบการดำเนินงานด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำยางสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นเนื้อยาง และ ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง

2.1.1.1 ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Dry rubber content ; DRC)

— อนุภาคยาง

อนุภาคยางถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกโปรตีนและไขมัน โดยโปรตีนจะอยู่ชั้นนอกบริเวณผิวหน้าของอนุภาค (รูปที่ 2.2) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นชนิดแอลฟาโกลบูลิน (α -Globulin) และฮีวิน (Hevein) และอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดง ปะปนอยู่เล็กน้อย ประมาณ 0.5 % ส่วนไขมันจะอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกฟอสโฟไลปิดชนิด α -Lecithin ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ลักษณะอนุภาคยางเป็นรูปทรงค่อนข้างกลม มีขนาดแตกต่างกันมาก คือ อยู่ระหว่าง 0.04 ถึง 4 ไมครอน อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเกิน 0.04 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1.2 ไมครอน เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูงพบว่า อนุภาคยางที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำขึ้นมาอยู่ด้านบนซึ่งสามารถแยกเป็นน้ำยางชั้น ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะปะปนอยู่กับหางน้ำยาง (Skim latex) [10]



รูปที่ 2.2 แสดงอนุภาคของยางธรรมชาติ [11]

เมื่อนำอนุภาคเม็ดยางมาวิเคราะห์ พบว่าส่วนประกอบของเนื้อยางแห้งโดยประมาณเป็นดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของเนื้อมะพร้าวแห้ง

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เนื้อมะพร้าวแห้ง	86
น้ำที่กระจายอยู่ในเนื้อมะพร้าวแห้ง	10
สารจำพวกโปรตีน	1
สารจำพวกไขมัน	3
โลหะ เช่น แมกนีเซียม (ซึ่งจะปะปนไปกับอนุภาคเม็ดทราย)	ไม่เกิน 0.05

2.1.1.2 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non rubber content)

— โปรตีน (Protein)

โปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำยางประกอบด้วย โปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยางประมาณ 25% โปรตีนที่อยู่ในชั้นน้ำ 50% และโปรตีนปนอยู่ในสารละลายอีก 25% ที่ผิวของอนุภาคน้ำยางสดเชื่อว่าเป็นโปรตีนซึ่งเป็นชั้นดูดซับ ส่วนของชั้นโปรตีนนี้เองที่ทำให้อนุภาคยางมีประจุลบ จุดไอโซอิเล็กตริกของอนุภาคยางมีค่าเท่ากับ pH ประมาณ 4.1 (จุดไอโซอิเล็กตริกคือจุดที่ประจุบวกและประจุลบบนโมเลกุลสมดุลกัน คือไม่แสดงประจุและการละลายน้อยที่สุด) โปรตีนบนผิวของอนุภาคยางจะมีกำมะถันอยู่ประมาณ 5% ดังนั้นขณะที่น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพจะเกิดการบูดเน่า โปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์และสารเมอร์แคปแทนทำให้มีกลิ่นเหม็น

— ไขมัน (Lipid)

ไขมันในอนุภาคน้ำยางสดประกอบด้วย sterols, sterol esters (ประมาณ 0.4% m/m), fats และ waxes (ประมาณ 0.6% m/m) และฟอสโฟไลปิด (ประมาณ 2% m/m) โดย sterols, sterol esters, fats และ waxes ส่วนใหญ่อยู่ในอนุภาคยาง ซึ่งอาจละลายอยู่ในเนื้อมะพร้าวแห้งสำหรับฟอสโฟไลปิดซึ่งเป็นส่วนดูดซับจะอยู่ที่ผิวของอนุภาคยาง

ไขมันที่อยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีนส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟไลปิดชนิด Lecithin ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยางเนื่องจากโมเลกุลเลซิทินแสดงประจุบวกที่ pH ของน้ำยางสด ในขณะที่โปรตีนแสดงประจุลบทำให้เกิดพันธะอออนระหว่างกัน น้ำยางในสภาวะที่เป็นต่าง เช่น มีแอมโมเนียอยู่ (ราว 0.6% ขึ้นไป) สารฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว ซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสบู่ทำให้น้ำยางมีความเสถียรยิ่งขึ้น น้ำยางที่มีแอมโมเนียปริมาณน้อย (ประมาณ 0.2% ในน้ำยาง) การไฮโดรไลซ์จะเกิดขึ้นน้อย จำเป็นต้องเพิ่มสบู่เพื่อเพิ่มความเสถียรของน้ำยาง [12]

— น้ำหรือเซรุ่ม

เซรุ่มของน้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ประกอบด้วยสารพวกคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารพวกแป้งและน้ำตาลและกรดอะมิโน

2.1.2 รูปแบบของยางธรรมชาติ

1. น้ำยางข้น (Concentrated latex)

น้ำยางข้นผลิตจากการนำน้ำยางสดจากส่วนที่มีปริมาณเนื้อยาง (Dry rubber content) เฉลี่ยประมาณ 35% สารละลายที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber solid) 5% และน้ำ (Water) มาผ่านกระบวนการแปรรูปให้อยู่ในรูปของน้ำยางข้นที่มีเนื้อยางแห้งอย่างน้อย 60% โดยใช้วิธีการปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูงเพื่อแยกน้ำและสารอื่น ๆ ที่ละลายอยู่ออกไปบางส่วน น้ำยางที่ได้จะเรียกว่า Centrifuged latex ซึ่งมีน้ำยางข้น 60% กับหางน้ำยาง จากนั้นจะต้องทำการรักษาสภาพด้วยการเติมแอมโมเนียเพื่อป้องกันไม่ให้ยางจับตัว ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่

- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia ; HA) จะใช้แอมโมเนีย 0.7% โดยน้ำหนัก
- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia ; LA) จะใช้แอมโมเนีย 0.2% โดยน้ำหนัก

2. ยางแผ่น (Rubber sheet)

การผลิตยางแผ่นนี้มีข้อดีคือ สามารถเก็บยางได้นานและยางที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูง (Flexibility) ขั้นตอนการทำยางแผ่นคือ การจับตัวน้ำยาง (Coagulation) การรีดยาง (Sheeting) การทำให้แห้ง (Drying) และการห่อ (Baling) โดยขั้นตอนการจับตัวน้ำยางทำโดยการเติมกรดฟอสฟอริกในน้ำยางที่เจือจางแล้ว ปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำยาง อาจใช้เวลาให้น้ำยางเกิดการจับตัวประมาณ 3 ชั่วโมง การรีดยางทำโดยการนำยางที่จับตัวแล้วผ่านลูกกลิ้งเรียบประมาณ 2-3 รอบ จากนั้นนำไปผ่านลูกกลิ้งมีลวดลายเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจะทำให้ยางแห้งได้เร็วขึ้น การที่จะให้ได้ยางแผ่นคุณภาพดีต้องคำนึงถึงความหนาของแผ่นยางและความสะอาด โดยในขั้นตอนการรีดยางรวมทั้งการเจือจางน้ำยางต้องใช้น้ำที่มีความสะอาดและต้องมีการฉีดน้ำเหนือลูกกลิ้งระหว่างการรีดแผ่นยาง ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสะอาดของยางแผ่น ส่วนขั้นตอนการทำยางให้แห้งทำโดยการแขวนยางที่รีดแล้วในที่โล่งเป็นเวลา 2-3 วัน และถ้าทำเป็นยางแผ่นรมควันในตอนหลัง จะนำยางมารมควันในห้องที่มีควันไม้ประมาณ 3 วัน ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียสแล้วจึงทำการห่อบรรจุ

3. ยางแท่ง (Block rubber)

เป็นยางที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการควบคุมความหนืดของยางที่

ใช้ในการแปรรูป เช่น อุตสาหกรรมยางท่อ, อุตสาหกรรมทำกาว โดยหลักสำคัญในการผลิตยางแท่งคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทำให้ยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ ล้างให้สะอาด แล้วนำมาอบให้แห้งอัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมแล้วห่อด้วยพลาสติก ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้อาจเป็นน้ำยางสด ยางสดก้อนแข็ง หรือเศษยาง [13]

2.1.3 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-Polyisoprene) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วนซึ่งไม่มีซัลเฟอร์ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีสมบัติที่ไม่ทนต่อน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ใน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบเส้นตรง ใน 1 หน่วยไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และหมู่อัลฟาเมทิลีนที่อ่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถันและทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเช่นเดียวกัน ดังนั้นการออกสูตรยางจำเป็นจะต้องมีแอนติออกซิแดนท์และแอนติโอโซนแชนท์ร่วมด้วย [3] ยางธรรมชาติมีสายโซ่ที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ -72 องศาเซลเซียสจึงสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก สำหรับความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุลทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด โดยการเกิดผลึกเนื่องจากการยึดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นนั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงซึ่งอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรงจะต้องมีการบดยางก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการบดยางโดยทั่วไปจะใช้เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) [14]

2.1.4 สมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีสมบัติโดดเด่นที่ดีกว่ายางไอโซพรีนสังเคราะห์ เช่น ความยืดหยุ่น (Elasticity) ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength) ความทนทานต่อการขีดถู (Abrasion resistance) ความเหนียวติดกัน (Tack) และสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) เป็นต้น ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติเหมาะกับการใช้ในเชิงวิศวกรรมที่ต้องรับแรงสูง โดยสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ ได้แก่

1. ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ยางธรรมชาติมีความสามารถในการยืดหยุ่น ซึ่งมีความแตกต่างจากของแข็งทั่วไปคือ ยางใช้แรงค้ำน้อยในการเปลี่ยนรูปและยางสามารถเปลี่ยนรูปได้มากซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับของแข็งชนิดอื่น เช่น เหล็กหรือเหล็กกล้าที่ต้องใช้แรงค้ำสูงในการเปลี่ยนรูปแต่สามารถเปลี่ยนรูปได้เพียงเล็กน้อย

ถ้าพิจารณาถึงความสามารถในการรับพลังงานในขณะที่มีแรงค้ำกระทำ พบว่ายางสามารถรับพลังงานได้ถึง 150 เทาของสปริงเหล็กกล้าเมื่อมีมวลเท่ากันและยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติมจะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถยืดได้ 100% หรือมากกว่านั้น ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติจะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นและลดลงตามพันธะที่วัลคาไนซ์

2. ความเหนียวติดกัน (Tack)

ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3. ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืดซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมชนิดเสริมแรงเข้าช่วย

4. สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties)

ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดีมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งานและมีความต้านทานต่อความล้า (Fatigue resistance) ที่สูงมาก จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

5. ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูงสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระป๋องน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดขณะความร้อนสูง

6. ความเป็นฉนวน (Insulation)

ยางธรรมชาติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเนื่องจากมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) สูง และมีความทนทานได้อิเล็กทริกสูง จึงสามารถใช้หุ้มสายเคเบิลไฟฟ้าได้ดีโดยเฉพาะสายที่มีความต้องการการโค้งงอมาก

7. ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance)

เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่าง ๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือ

เอ็กสแต็กสอล นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ทั้งห้ามีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility)

ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากยางธรรมชาติมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature ; Tg) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส โดยการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะใช้งานได้ในช่วงเวลาสั้นๆ

9. การเสีयरูปลังการกด (Compression set)

ยางธรรมชาติมีการเสีयरูปลังการกดค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิปานกลาง อย่างไรก็ตามการเสีयरูปลังการกดที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้น เนื่องจากยางเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการเสีयरูปลังการกดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อนจึงเกิดการเสื่อมสภาพ

10. การกระดุ้งกระดอน (Rebound resilience)

ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดุ้งกระดอนสูงและในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างยางจะไม่สะสมพลังงานไว้ในตัวเมื่อได้รับแรงกระทำ ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต

11. อุณหภูมิของการใช้งาน (Service temperature)

ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 55 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานานอาจเกิดการตกผลึก ซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและเสียความยืดหยุ่น แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไปสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ก็จะต้องลดลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ

ส่วนข้อจำกัดของยางธรรมชาติ คือ มีความทนทานต่อการบวมตัวในน้ำมันและสารละลายไฮโดรคาร์บอนต่ำ อีกทั้งยังมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซนและแสงแดด (Aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มากทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารในกลุ่มของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน

2.1.5 สารเคมีสำหรับยาง [15] แบ่งตามการใช้งานได้ดังนี้

1. สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent)

เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (Crosslink) เป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็วและยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerators)

สารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูปหรือปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางให้เกิดเร็วขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยลดการใช้กำมะถันและให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอยิ่งขึ้น เช่น กัวนิดิน, ไธอาโซล, ซัลฟิनाไมด์, ไธยูแรม เป็นต้น ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง

3. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators)

สารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น โดยทำให้ยางมีโมดูลัส (Modulus) สูงขึ้น ได้แก่ กรดสเตียริก (Stearic acid) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 2-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริกในปริมาณ 1-2 phr

4. สารตัวเติม (Fillers)

สารอื่นๆที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้นหรือเพื่อลดต้นทุนในการผลิต โดยแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงเช่น พวงเขมาดำ (Carbon black) และซิลิกา (Silica) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงเช่น ดินขาว, ทัลคัม และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)

5. สารช่วยในการแปรรูปยาง (Plasticizers)

สารที่เติมลงไปแล้วทำให้ยางอ่อนตัว (โดยไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี) เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น เร็วขึ้น และช่วยลดอุณหภูมิการผลิตให้ต่ำลง อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติด ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำของยางได้ด้วย ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oil) ไชพาราฟิน (Paraffin wax)

6. สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agent)

สารป้องกันการเสื่อมสภาพเป็นสารเคมีที่เติมลงไปในสูตรเคมีเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ สารแอนติออกซิแดนท์และสารแอนตี้โอโซนแนท

7. สารพวกอื่นๆ

ใส่ลงไปในยางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) สารหน่วงปฏิกิริยาการคงรูป (Retarder) สารหน่วงไฟ (Flame retardants) สารดูดความชื้น (Desiccants) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ซัลเฟอร์ (Sulfur)

กำมะถัน หรือ ซัลเฟอร์ (Sulfur หรือ Sulphur) เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ S และเลขอะตอม 16 เป็นอโลหะที่มีอยู่ทั่วไป ไม่มีรสหรือกลิ่น และมีวาเลนซ์ได้มากมาย ลักษณะทางกายภาพของซัลเฟอร์มีลักษณะเป็นผลึกสีเหลืองอำพัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในธรรมชาติสามารถพบได้ในรูปธาตุเอง หรือแร่ซัลไฟด์และซัลเฟต เป็นธาตุจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตคือสำคัญต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต และพบในกรดอะมิโนหลายชนิด การใช้ในเชิงพาณิชย์ที่เป็นหลักคือในปุ๋ย แต่นอกจากนี้ยังใช้ในดินปืน ไม้ขีดไฟ ยาฆ่าแมลงและยาฆ่ารา โดยในดินจะพบซัลเฟอร์ในรูปของสารประกอบซัลไฟด์หรือซัลเฟต ซัลเฟตในทะเลหรือแหล่งน้ำจะพบซัลเฟอร์ในรูปสารละลายซัลเฟตและในอากาศ จะพบซัลเฟอร์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และฝุ่นละอองซัลเฟอร์ [16-17]



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของซัลเฟอร์ [18]

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทั่วไปของซัลเฟอร์

ชื่อ, สัญลักษณ์, เลขอะตอม	กำมะถัน, S, 16
อนุกรมเคมี	แฮลโคเจน
หมู่, คาบ, บล็อก	6, 3, p
มวลอะตอม	32.065(5) กรัม/โมล
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ne] $3s^2 3p^4$
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 6

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพของซัลเฟอร์

สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	(alpha) 2.08 ก./ซม. ³
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	(beta) 1.96 ก./ซม. ³
ความหนาแน่น (ใกล้อุณหภูมิห้อง)	(gamma) 1.92 ก./ซม. ³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในชื่อและภาพลักษณ์ของสถาบันฯ เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	1.819 ก./ซม. ³					
จุดหลอมเหลว	388.36 K (115.21 °C)					
จุดเดือด	717.8 K(444.6 °C)					
ความร้อนของการหลอมเหลว	(mono) 1.727 กิโลจูล/โมล					
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	(mono) 45 กิโลจูล/โมล					
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 22.75 J/(mol·K)					
ความดันไอ						
P/Pa	1	10	100	1 k	10 k	100 k
ที่ T K	375	408	449	508	591	717

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติของอะตอมซิลเฟอร์

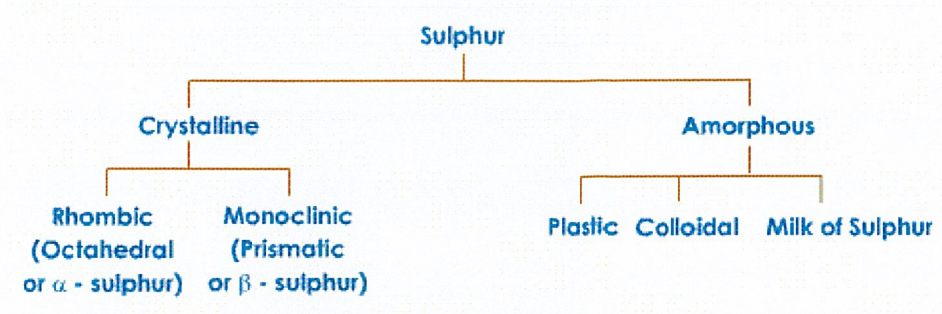
โครงสร้างผลึก	orthorhombic
สถานะออกซิเดชัน	-1, ±2, 4, 6 (ออกไซด์เป็นกรดแก่)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	2.58 (พอลิงสเกล)
พลังงานไอออไนเซชัน	ระดับที่ 1: 999.6 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 2: 2252 กิโลจูล/โมล
	ระดับที่ 3: 3357 กิโลจูล/โมล
รัศมีอะตอม	100 pm
รัศมีอะตอม (คำนวณ)	88 pm
รัศมีโควาเลนต์	102 pm
รัศมีวานเดอร์วาลส์	180 pm

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติอื่นๆของซิลเฟอร์

ความต้านทานไฟฟ้า	(20 °C) (amorphous) $2 \times 10^{15} \Omega \cdot m$
การนำความร้อน	(300 K) (amorphous) 0.205 W/(m·K)
โมดูลัสของแรงบีบอัด	7.7 GPa
ความแข็งโมห์ส	2.0

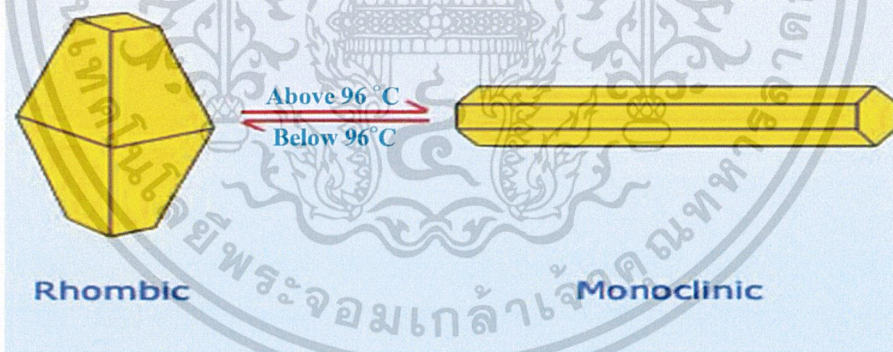
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 อัญรูปของซัลเฟอร์ [19]



รูปที่ 2.4 แสดงแผนผังอัญรูปต่าง ๆ ของซัลเฟอร์ [19]

เราสามารถพบกำมะถันในโครงสร้างต่าง ๆ ในสถานะทางกายภาพ (Physical state) เดียวกัน อย่างไรก็ตามโครงสร้างผลึกที่มักพบมากที่สุดคืออโรมบิกหรือออกตะฮีดรอล (α -Sulfur) และมอนอคลินิก (β -Sulfur) โดยอโรมบิก (Rhombic Sulfur) มักพบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 96 องศาเซลเซียส ในทางกลับกันมอนอคลินิก (Monoclinic Sulfur) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 96 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ 96 องศาเซลเซียสนี้เป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนผ่านระหว่างโครงสร้างผลึกทั้งสองโครงสร้าง



รูปที่ 2.5 แสดงอัญรูปของกำมะถันที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ [20]

มีอีกหนึ่งอัญรูปของซัลเฟอร์คือพอลิเมอร์ซัลเฟอร์ (Polymeric sulfur : S_8) ซึ่งเป็นอนุภาควงแหวนแปดเหลี่ยมที่ไม่สามารถละลายได้ในสารอินทรีย์ ยางสังเคราะห์และยางธรรมชาติ อีกทั้งยังไม่ละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์อีกด้วย โดยสมบัติของอัญรูปหลักของซัลเฟอร์มีดังต่อไปนี้

1. รอมบิก (Rhombic Sulfur)

เป็นรูปแบบที่เสถียรและมักพบได้บ่อยที่สุดในธรรมชาติ มีลักษณะเป็นผลึกสีเหลืองและโปร่งแสง มีจุดหลอมเหลว 114 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นคือ 2.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 96 องศาเซลเซียส ละลายได้ดีในคาร์บอนไดซัลไฟด์ เบนซีน โทลูอิน และน้ำมันสนที่ร้อน ไม่ละลายในน้ำ

2. มอนอคลินิก (Monoclinic Sulfur)

เป็นผลึกสีเหลืองอำพันลักษณะเป็นแท่งยาวคล้ายเข็มและโปร่งใส มีจุดหลอมเหลว 119 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของ คือ 1.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 96 องศาเซลเซียสและจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นรอมบิก ละลายได้ดีในคาร์บอนไดซัลไฟด์ ไม่ละลายในน้ำ โดยกำมะถันมอนอคลินิกเตรียมได้โดยนำกำมะถันผงละลายในโทลูอินร้อน ๆ จนได้สารละลายอิ่มตัว แล้วกรองหลังจากทิ้งไว้ให้เย็นจะได้ผลึกแยกออกมา [19, 21, 22]



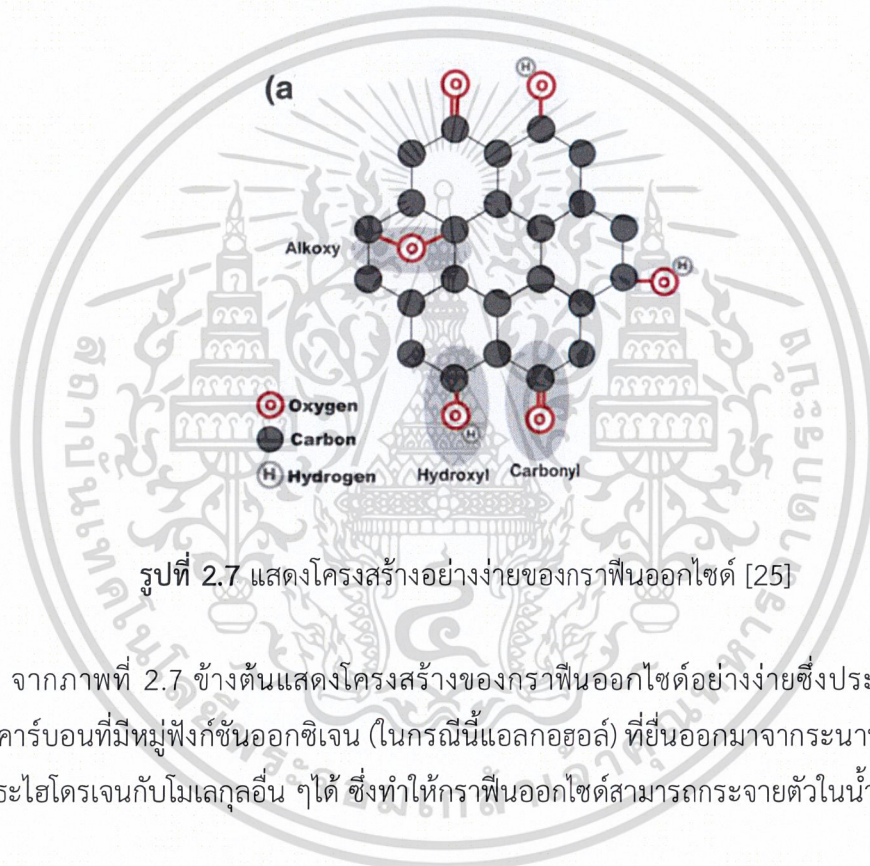
2.2.2 การนำไปใช้งาน [24]

- ใช้ในกระบวนการการกำมะถันในซังยาง
- ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อราและใช้ในดินปืนสีดำ
- ใช้ในการผลิตกรดซัลฟิวริก โดยการใช้น้ำที่สะอาดที่สุดของกรดซัลฟิวริกคือการผลิตกรดฟอสฟอริกเพื่อผลิตฟอสเฟตสำหรับปุ๋ย
- เมอร์แคปแทน (Mercaptans) เป็นตระกูลของสารประกอบออร์กาโนซัลเฟอร์ บางส่วนถูกเติมลงในก๊าซธรรมชาติเนื่องจากมีกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์จึงสามารถใช้ตรวจจับการรั่วไหลของก๊าซได้
- ใช้ในการขัดเงิน การผลิตยาฆ่าแมลงและสารกำจัดวัชพืช
- ซัลไฟต์ใช้ในการฟอกขาวกระดาษและเป็นสารกันบูดสำหรับอาหารมากมาย
- สารลดแรงตึงผิวและผงซักฟอกจำนวนมากเป็นอนุพันธ์ของซัลเฟต
- แคลเซียมซัลเฟต (ยิปซั่ม) ใช้ในกระบวนการการผลิตปูนซีเมนต์และปูนปลาสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานและต้องอ้างอิงถึงหน่วยงานของครูผู้สอนในการนำไปใช้

2.3 กราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) เป็นมีโครงสร้างเป็นชั้นอะตอมชั้นเดี่ยวของคาร์บอน เป็นอีกรูปหนึ่งของวัสดุกราฟีน (Graphene) โดยมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนติดอยู่ทั้งบริเวณด้านข้างและพื้นผิว ซึ่งจากการมีกลุ่มออกซิเจนบริเวณพื้นผิวนั้นส่งผลให้เกิดการแตกของพันธะคู่ที่บริเวณอะตอมของคาร์บอนจึงทำให้สูญเสียสภาพการนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามกลุ่มออกซิเจนเหล่านี้เพิ่มสภาพความมีขั้วให้กราฟีนออกไซด์จึงทำให้สามารถกระจายในตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดีเช่น น้ำ เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ไม่ทำปฏิกิริยาจึงทำให้สารละลายกราฟีนออกไซด์สามารถแยกตัวและทำให้แห้งเป็นแผ่นฟิล์มได้อย่างง่ายดาย



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของกราฟีนออกไซด์ [25]

จากภาพที่ 2.7 ข้างต้นแสดงโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์อย่างง่ายซึ่งประกอบไปด้วยระนาบคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน (ในกรณีนี้แอลกอฮอล์) ที่ยื่นออกมาจากระนาบ ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลอื่น ๆ ได้ ซึ่งทำให้กราฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวในน้ำได้ [26]

2.3.1 สมบัติของกราฟีนออกไซด์

1. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

กราฟีนออกไซด์มีความแข็งแรงสูงเนื่องจากโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนที่เรียงตัวต่อกันเป็นวงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงและเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้งจึงเป็นผลให้กราฟีนออกไซด์มีความแข็งแรงสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

เนื่องจากที่บริเวณพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ คาร์บอนมีการสร้างพันธะกับออกซิเจนจึงทำให้มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ sp^3 ส่งผลในโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ให้ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นพาหะในการนำไฟฟ้า (Charge carriers) จึงทำให้กราฟีนออกไซด์ไม่มีสมบัติด้านการนำไฟฟ้า แต่มีสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี

3. สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

เป็นเช่นเดียวกับสมบัติทางไฟฟ้า คือกราฟีนออกไซด์มีสมบัติการนำความร้อนต่ำจึงมีสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี เนื่องจากคาร์บอนมีการสร้างพันธะกับออกซิเจนจึงทำให้มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ sp^3 ส่งผลในโครงสร้างของ กราฟีนออกไซด์ให้ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระทำให้ไม่สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ กราฟีนออกไซด์จึงไม่มีสมบัติด้านการนำความร้อน

4. กราฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วได้

เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนที่บริเวณพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ได้ จึงเป็นผลให้กราฟีนออกไซด์สามารถดูดความชื้น กระจายตัวในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วได้

5. สามารถปรับแต่งคุณสมบัติให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้โดยการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันบริเวณพื้นผิวด้วยกระบวนการทางเคมี

2.3.2 การนำไปใช้งาน

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Devices) เช่น ผลิตเป็นฟิล์มนำไฟฟ้าที่มีความโปร่งใสสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความยืดหยุ่น เซลล์แสงอาทิตย์ จอแสดงภาพแบบ LCD อุปกรณ์ตรวจวัดทางเคมีและอุปกรณ์หน้าจอสัมผัสต่าง ๆ เป็นต้น

2. อุปกรณ์ในการจัดเก็บพลังงาน (Energy Storage Device) เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวสูงมาก จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุอิเล็กโทรดในแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุแบบสองชั้น (Double-layered capacitors) เช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์แสงอาทิตย์

3. อุปกรณ์ตรวจวัดทางชีวภาพ (Biosensors) กราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุพลาสมารีสอนเซนส์ที่สามารถนำมาใช้งานด้านชีวภาพสำหรับการตรวจหาโรคในระยะแรกและตรวจจับโมเลกุลที่เกี่ยวข้อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าทางชีวภาพ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การใช้งานทางด้านชีวการแพทย์ (Biomedical Applications) กราฟีนออกไซด์ถูกนำมาใช้งานทางด้านชีวการแพทย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการนำส่งยา (Drug-delivery systems) นอกจากนี้กราฟีนออกไซด์มีแนวโน้มที่จะดีกว่ายาต้านมะเร็งอื่น ๆ เนื่องจากมันไม่ได้มุ่งไปที่เซลล์ที่แข็งแรง แต่มุ่งไปยังเซลล์ที่เป็นเป้าหมายเท่านั้น อีกทั้งยังมีความเป็นพิษต่ำอีกด้วย

5. การกรองน้ำ (Water Purification) การซึมผ่านของน้ำผ่านเยื่อหุ้มนั้นเกิดจากการบวมของโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ซึ่งทำให้เกิดเส้นทางการแทรกซึมของน้ำระหว่างชั้นกราฟีนออกไซด์ แผ่นกราฟีนออกไซด์สามารถใช้ในการกรองน้ำทะเลได้เนื่องจากฟิล์มของกราฟีนออกไซด์นั้นบางมาก (มีความหนาเพียงอะตอมเดียว) ดังนั้นน้ำจึงซึมผ่านรูเล็ก ๆ ที่อยู่ในกราฟีนได้ ฟิล์มของกราฟีนออกไซด์นั้นมีความบางกว่าตัวกรองที่ดีที่ใช้กันในเชิงพาณิชย์ถึง 500 เท่าและแข็งแรงกว่าเหล็กถึง 1,000 เท่า แต่การความสามารถในการซึมผ่านของมันนั้นมากกว่าฟิล์มกรองที่ดีที่สุดที่ใช้กันในเชิงพาณิชย์ถึง 100 เท่า

6. การเคลือบผิว (Coating Technology) แผ่นกราฟีนออกไซด์มีความโปร่งใส กราฟีนเคลือบบนแผ่นฟิล์มพลาสติกสามารถนำมาใช้ในบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์เพื่อปรับปรุงอายุในการเก็บรักษา

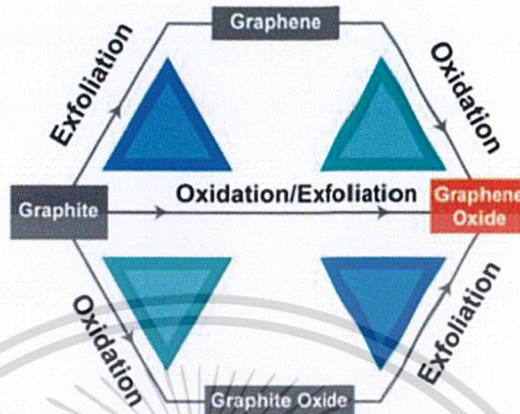
7. วัสดุคอมโพสิตและวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกระดาษ (Composites and Paper-Like Materials) กราฟีนออกไซด์สามารถผสมเข้ากับพอลิเมอร์ได้ง่ายและหลากหลายชนิดเกิดเป็นนาโนคอมโพสิตและช่วยเพิ่มคุณสมบัติของพอลิเมอร์เดิมได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น ความต้านทานแรงดึง สภาพการนำไฟฟ้าและเสถียรภาพทางความร้อน กราฟีนออกไซด์ในรูปแบบที่เป็นของแข็งจะมีแนวโน้มที่จะเกาะติดกันและเกิดโครงสร้างลักษณะคล้ายกระดาษที่บางและมีความเสถียรสูงซึ่งสามารถพับย่นและยืดได้ [27]

2.3.3 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้ในตัวกลางที่แห้งหรือเปียก วิธีการสังเคราะห์แบบแห้งประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของกราฟีนผ่านออกซิเจนในสภาวะสุญญากาศสูงพิเศษเพื่อสัมผัสกับโมเลกุลออกซิเจน และการใช้โอโซนภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ในทางตรงกันข้ามวิธีการสังเคราะห์แบบเปียกซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กราฟไฟท์เป็นตัวตั้งต้นเนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง ในภาพที่ 8 จะมีการแสดงปฏิกิริยาหลักสามปฏิกิริยา โดยวิธีแรกเริ่มต้นด้วยการใช้กราฟีนที่ผลิตด้วยวิธีเชิงกลตามด้วยการออกซิเดชัน ในขณะที่วิธีที่สองขึ้นอยู่กับการหลุดออกในตัวกลางที่เป็นสารละลายด้วยการใช้คลื่นอัลตราโซนิก วิธีสุดท้ายใช้กระบวนการออกซิเดชันและการหลุดออกพร้อมกันในตัวกลางที่เป็นกรดอย่างรุนแรง (วิธีการของ Brodie-Staudenmaier-Hummers) แม้ว่าวิธีการเหล่านี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปสู่การก่อตัวของกราฟีนออกไซด์เช่นเดียวกัน แต่คุณสมบัติเชิงโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ในแต่ละวิธีนั้นแตกต่างกันเช่น โครงสร้างหรือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา



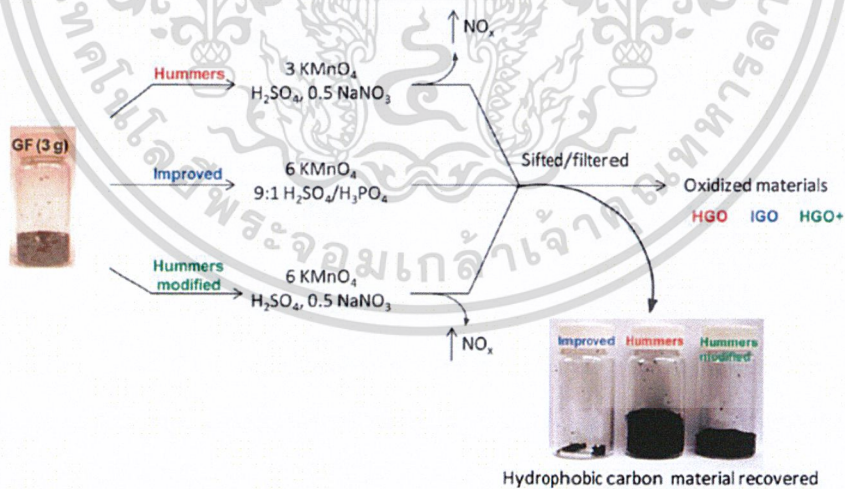
รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการผลิตกราฟีนออกไซด์ 3 รูปแบบ [25]

วิธีการเตรียมกราฟีนออกไซด์ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมาได้มีการเสนอวิธีการหลายวิธีและวิธีการหลักสามวิธีคือ วิธีการของโบรดี (Brodie Method), วิธีการของสตอดเดนเมียร์ (Staudenmaier Method) และวิธีการของฮัมเมอร์ (Hummers Method) จากวิธีการพื้นฐานเหล่านี้มีการปรับปรุงจำนวนมากเพื่อพัฒนาผลผลิตและคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์เช่น วิธีการทัวร์ วิธีการดั้งเดิมถูกนำไปใช้โดยนักวิจัยจำนวนมากซึ่งประกอบด้วยวิธีการหลุดลอกออกในน้ำและการออกซิเดชันของกราฟไฟต์ผ่านตัวออกซิไดซ์ที่แรงในตัวกลางที่สามารถแตกตัวได้ (มักเป็น H_2SO_4)

- วิธีการของโบรดี (Brodie Method) การสังเคราะห์ครั้งแรกของวัสดุกราฟไฟต์ออกไซด์ในปี 1859 การศึกษาของเขามุ่งเน้นไปที่การหาน้ำหนักของกราฟไฟต์และมีการตรวจสอบปฏิกิริยาทางเคมีที่หลากหลายเพื่ออธิบายคุณสมบัติของวัสดุใหม่ ดังนั้นกราฟไฟต์ถูกผสมกับโพแทสเซียมคลอไรด์ ($KClO_3$) และละลายในกรดพุ่มิโคนไนตริกเพื่อออกซิไดซ์และหาน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเผยให้เห็นองค์ประกอบของคาร์บอนประมาณ 60%, ไฮโดรเจนประมาณ 2% และออกซิเจนประมาณ 38% ได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นส่วนผสมของกราฟีนและกราฟไฟต์ออกไซด์สามารถละลายได้ในน้ำบริสุทธิ์
- วิธีการของสตอดเดนเมียร์ (Staudenmaier Method) ในปี 1898 Staudenmaier ได้ปรับปรุงปฏิกิริยาของ Brodie โดยการเพิ่มกรดซัลฟูริกเพื่อเพิ่มความเป็นกรดของสารผสมและ $KClO_3$ ตลอดจนการทำปฏิกิริยา แต่วิธีการของโบรดีและสตอดเดนเมียร์สร้างก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) ซึ่งสลายตัวในอากาศอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเข้าถึงเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิธีการของฮัมเมอร์ (Hummers Method) ในปีพ. ศ. 2501 ฮัมเมอร์และออฟแมน เสนอวิธีการที่มีความปลอดภัยที่สูงขึ้นและลดระยะเวลาลงอย่างมากจาก 10 วันเหลือเพียง 2 วัน โดยผสมกราไฟต์กับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4), โซเดียมไนเตรต (NaNO_3) และ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) จะได้สารแขวนลอยสีเทาอมน้ำตาล สารแขวนลอยนี้ ถูกเจือจางด้วยน้ำและเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เพื่อเร่งการเกิดออกซิเดชันและ เพื่อกำจัดแมงกานีสจะได้เป็นสารผสมสีเหลืองน้ำตาล ซึ่งจะถูกรองและล้างด้วยน้ำอุ่น โดย อัตราการเกิดออกซิเดชันเท่ากับวิธีของ Staudenmaier แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือกระบวนการ การแยกและการทำให้บริสุทธิ์ใช้เวลานาน อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถสังเคราะห์กราฟีน ออกไซด์ที่มีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตรและความหนาเท่ากับ 1 ไมโครเมตรได้
- วิธีการทัวร์ (Tour Method) เป็นการปรับปรุงวิธีของฮัมเมอร์ ในปี 2010 พวกเขาได้แทนที่ โซเดียมไนเตรตด้วยกรดฟอสฟอริกในส่วนผสมของ $\text{H}_2\text{SO}_4 / \text{H}_3\text{PO}_4$ (9: 1) และเพิ่มจำนวน KMnO_4 ข้อดีของวิธีนี้คือไม่สร้างก๊าซพิษเช่น NO_2 , N_2O_4 หรือ ClO_2 และควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย การใช้กรดฟอสฟอริกทำให้เกิดระนาบฐานกราฟิตที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น การเปรียบเทียบ วิธีการที่ได้รับการปรับปรุงกับกระบวนการของฮัมเมอร์แสดงในรูปที่ 2.9 ข้อดีของวิธีทัวร์คือ การผลิตกราฟีนออกไซด์ที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกที่สูงกว่าในทางตรงกันข้ามวิธีของฮัมเมอร์ จึงส่งผลให้ความสามารถในการออกซิไดซ์และการละลายมีมากขึ้น



รูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการทัวร์กับวิธีการฮัมเมอร์ [25]

ในวิธีการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ข้างต้นทั้งหมดมีข้อจำกัดบางประการ ชั้นแรกความปลอดภัย การใช้โซเดียมไนเตรตหรือโพแทสเซียมคลอเรตในวิธีการของโบรดีหรือสตอเดนเมียร์ส่งผลให้เกิดการระเบิดได้ ในขณะที่โซเดียมไนเตรต (ในวิธีการของฮัมเมอร์) หรือไอกรดไนตริกทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่อาจรับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่เกิดขึ้นจากการใช้เอกสารฉบับนี้

ข้อบกพร่องในโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา การเกิดโดแมงกานีสเฮป-

ทอกไซด์ (Mn_2O_7) ในสารละลายของกรดซัลฟิวริกทำให้เกิดการระเบิดด้วยอุณหภูมิมากกว่า $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ อีกปัจจัยที่สำคัญคือคุณภาพและขนาดของกราฟไฟต์ โครงสร้างที่ปราศจากข้อบกพร่องให้คุณภาพของกราฟไฟต์ออกไซด์ที่สูงขึ้นและขนาดของเกรนจะกำหนดขนาดสำหรับระนาบฐานกราฟไฟต์ นอกจากนี้ อัตราส่วน C : O และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการในการสังเคราะห์

2.4 เชื้อแบคทีเรีย

แบคทีเรีย (Bacteria) เป็นสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กมากจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น (Microorganism) มีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม แบคทีเรียบางชนิดสามารถทำให้เกิดโรคในมนุษย์ได้ ในขณะเดียวกันก็มีแบคทีเรียบางชนิดที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง แบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถอยู่เป็นอิสระนอกร่างกายมนุษย์ได้ มีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่จำเป็นต้องอาศัยอยู่ในเซลล์ของมนุษย์เพื่อการดำรงชีวิต

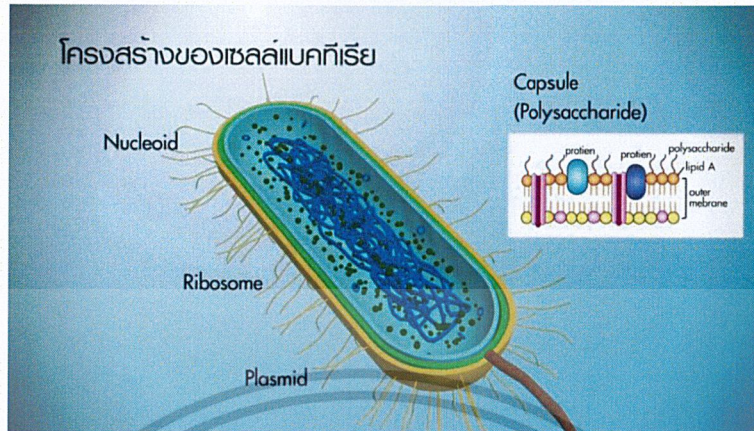
2.4.1 ชนิดของแบคทีเรีย

การแบ่งชนิดของแบคทีเรียสามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น

- แบ่งตามการติดสีย้อมแกรม (Gram stain) ถ้าย้อมแกรมติดสีน้ำเงินเรียกว่า แบคทีเรียชนิดแกรมบวก (Gram positive bacteria) ถ้าย้อมแกรมติดสีแดงเรียกว่าแบคทีเรียชนิดแกรมลบ (Gram negative bacteria)
- แบ่งตามรูปร่างของแบคทีเรีย เช่น แบคทีเรียรูปร่างกลมเรียกว่าคอคคัส (*Coccus*) แบคทีเรียรูปร่างเป็นแท่งเรียกว่า บาซิลลัส (*Bacillus*) แบคทีเรียรูปร่างบิดเป็นเกลียวเรียกว่า สไปโรคีท (*Spirochete*)
- แบ่งตามการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรีย ทั้งนี้ชนิดต่างๆของแบคทีเรียทำให้มีความแตกต่างในด้านต่าง ๆ เช่น แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตเรียกว่า แอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic bacteria) และแบคทีเรียที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตเรียกว่า แอโนโรบิกแบคทีเรีย (Anaerobic bacteria)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 โครงสร้างของเซลล์แบคทีเรีย [28]



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของเซลล์แบคทีเรีย [28]

1. ผนังเซลล์ (Cell wall) ทำหน้าที่คงรูปร่างของเซลล์ ป้องกันเซลล์แตก ควบคุมการผ่านเข้าออกของน้ำและสารประกอบที่เป็นอาหารต่าง ๆ เนื่องจากมีรูพรุน เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) ต่างกัน ผนังเซลล์ของแบคทีเรียเป็นแอนติเจน (Antigen) ที่ไปกระตุ้นร่างกายคนและสัตว์ให้สร้างแอนติบอดี (Antibody) โครงสร้างภายในผนังเซลล์ที่แตกต่างกันทำให้การย่อยสลายแบคทีเรียจะติดสีแตกต่างกัน ทำให้แยกชนิดของแบคทีเรียเบื้องต้นได้
2. เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) เป็นเยื่อบาง ๆ อยู่ถัดจากผนังเซลล์เข้าไป สิ่งมีชีวิตทุกชนิดจะมีเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) และโปรตีน (Protein) หน้าที่ของเยื่อหุ้มเซลล์คือ ควบคุมการผ่านเข้าออกของสารต่าง ๆ เกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์ การสร้างพลังงานของเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ส่วนที่ยื่นเข้าไปในส่วนของเซลล์ (Cytoplasm) เรียกว่า Mesosome ทำหน้าที่สะสมน้ำย่อย (Enzyme) และสารต่าง ๆ ที่จำเป็นของเซลล์
3. ไซโทพลาสซึม (Cytoplasm) เป็นส่วนที่อยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ ประกอบด้วย น้ำ น้ำย่อย ออกซิเจน และอาหารที่จำเป็น เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และของเสีย

- แฟล็กเจลลา (Flagella) มีในแบคทีเรียบางชนิด มีลักษณะเป็นเส้นยื่นออกยาวไปภายนอกเซลล์ยื่นออกไปจากส่วนที่อยู่ในไซโทพลาสซึมติดกับเยื่อหุ้มเซลล์ ยื่นผ่านเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ออกไป ส่วนประกอบที่สำคัญเป็นโปรตีนที่เรียกว่า แฟล็กเจลลิน (Flagellin) มีคุณสมบัติเป็นแอนติเจน หน้าที่สำคัญของแฟล็กเจลลาคือทำให้แบคทีเรียเคลื่อนที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Pili หรือ Fimbriae ส่วนใหญ่พบในแบคทีเรียแกรมลบ มีลักษณะเป็นท่อนสั้น ๆ ยื่นออกจากไซโทพลาสซึม ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ออกไปนอกเซลล์ แต่ขนาดสั้นกว่า Flagella หน้าที่ของ Pili คือ ช่วยในการยึดเกาะกับสิ่งอื่น
- 4. Cytoplasmic granules แบคทีเรียจะสะสมอาหารไว้ในรูปของแกรนูล โดยเก็บเป็นไขมัน กำมะถัน สารอนินทรีย์ฟอสเฟต และแป้ง เป็นต้น
- 5. Nuclear material เป็นก้อนนิวเคลียสกระจายอยู่ทั่วไปใน Cytoplasm มีรูปร่างไม่แน่นอน มีโมเลกุลของ DNA มีหน้าที่ควบคุมการแบ่งเซลล์ และการทำงานของเซลล์
- 6. สปอร์ หรือ Endospore แบคทีเรียบางชนิดจะสร้างสปอร์ภายในเซลล์ สปอร์จะถูกห่อหุ้มด้วยผนังหลายชั้นซึ่งทนทานต่อ ความร้อน ความแห้งแล้ง และสารเคมีได้ หน้าที่ของสปอร์ทำให้แบคทีเรียมทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้นาน ๆ
- 7. แคปซูล (Capsule) มีในแบคทีเรียบางชนิด แคปซูลจะอยู่นอกสุดของเซลล์ ห่อหุ้มผนังเซลล์ไว้ลักษณะเป็นเมือกเหนียว มีหน้าที่ป้องกันเซลล์ของแบคทีเรียไม่ให้ถูกเม็ดเลือดขาวทำลาย

2.4.3 ความแตกต่างของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ [29]

การย้อมแกรมเป็นเทคนิคในการศึกษาจุลินทรีย์ โดยดูสีที่ย้อมติดกับตัวจุลินทรีย์ลักษณะการย้อมติดที่ตัวเซลล์เป็นแบบ Differential strain ซึ่งเป็นการใช้สีย้อมมากกว่าหนึ่งชนิด สีจะติดตามไซโทพลาสซึมและผนังเซลล์ทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างเซลล์แบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ได้ ผู้ที่คิดค้นการย้อมสีวิธีนี้คือ Hans Christian Gram ในปี ค.ศ.1884 ผลของการย้อมสีแกรมทำให้จำแนกแบคทีเรียออกได้ 2 กลุ่ม คือ

1. แกรมบวก (Gram positive) แบคทีเรียที่ย้อมติดสีน้ำเงินม่วง
2. แกรมลบ (Gram negative) แบคทีเรียที่ย้อมติดสีแดง

ซึ่งใช้คุณสมบัติความแตกต่างกันของเมมเบรนของแบคทีเรียทั้งสองชนิดในการย้อม โดยผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบบมีข้อแตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ 2.7 แสดงความแตกต่างระหว่างแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ

ส่วนประกอบ	Gram positive	Gram negative
กรดอะมิโน	ประกอบด้วยกรดอะมิโน 3-4 ชนิด คือ Alanine, Glutamic acid, Lysine หรือ กรดไดอะอะมิโนพิเมลลิก	ส่วนใหญ่เป็นกรดอะมิโนที่เป็น ส่วนประกอบของโปรตีนซึ่งรวมทั้ง กรดไดอะอะมิโนพิเมลลิก
Peptidoglycan	60-100%	5-20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เชิงพาณิชย์
 ไม่สามารถนำข้อมูลนี้ไปทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

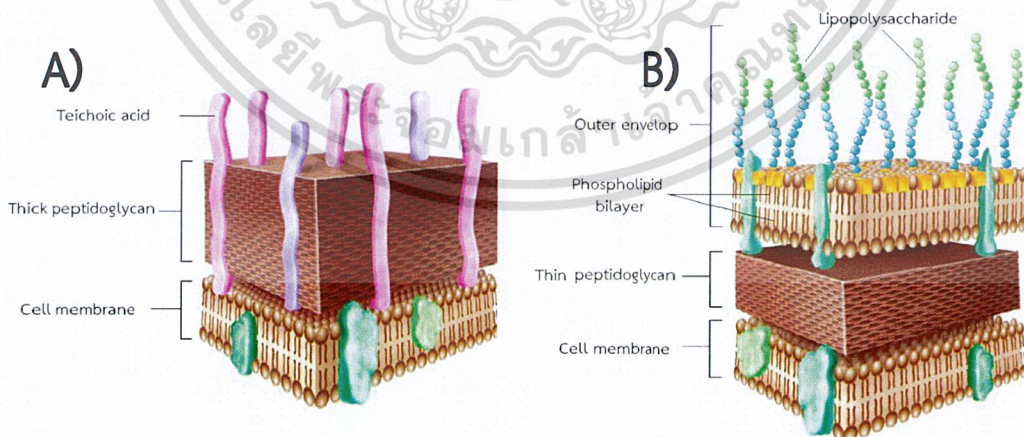
ปริมาณ lipid	0.2%	10-20%
Polysaccharide	35-60%	15-20%
ความหนา	20-80 นาโนเมตร	10 นาโนเมตร
กรดทีโคอิก	บางชนิดมี	ไม่มี
ผนังเซลล์	ผนังเซลล์ 1 ชั้น (เป็นชั้นหนาของ peptidoglycan เพียงชั้นเดียว)	ผนังเซลล์ 2 ชั้น (ชั้นนอกเป็นชั้นไขมันและชั้นใน เป็นชั้นบางของ peptidoglycan)
คุณสมบัติ	<ul style="list-style-type: none"> - หนาร้อนมากกว่า - ทนแรงดันมากกว่า - ทนการฉายรังสีมากกว่า - ทนสารเคมีมากกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่หนาร้อน - ไม่ทนแรงดัน - ไม่ทนต่อการฉายรังสี - ไม่ทนสารเคมี

ผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวก

- มีผนังเซลล์หนาประมาณ 20-80 นาโนเมตร ซึ่งหนากว่าแกรมลบและคิดเป็น 20-40% ของน้ำหนักเซลล์เมื่อทำให้แห้ง

- องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเปปติโดไกลแคน นอกจากนี้มีโพลีแซ็กคาไรด์ เช่น Manose, arabinose, Galactose, Glucosamine, โพรตีน, น้ำตาลที่เป็นกรด เช่น Glucuronic acid, Mannuronic acid, Teichoic acid ซึ่งเป็น Sugar alcohol

**กรดทีโคอิก เป็นโพลีเมอร์ที่ละลายน้ำได้ประกอบด้วย Ribitol หรือ Glycerol



รูปที่ 2.11 แสดงความแตกต่างของผนังเซลล์แบคทีเรีย โดย A) ผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวก และ B) ผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบ [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของพอลิเมอร์ [30]

กลไกการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุผสมกราฟีนมีหลายกลไกด้วยกัน ได้แก่ Bacterial membrane stress, Oxidative stress และ Wrapping isolation ซึ่งกลไกเหล่านี้สามารถเกิดร่วมกันหรือเกิดแยกกันก็ได้

1. Bacterial membrane stress

เป็นการแยกฟอสโฟลิปิดออกจากเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย โดยในตอนต้นเซลล์แบคทีเรียยังสามารถทำงานในช่วงเวลาสั้น ๆ หลังจากนั้นพบว่ามีการสูญเสียความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์บางส่วนและในบางเซลล์มีความหนาแน่นของฟอสโฟลิปิดลดลง ในที่สุดเยื่อหุ้มเซลล์ได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงและสูญเสียไซโทพลาสซึมบางส่วนอย่างสมบูรณ์ การต่อต้านเชื้อแบคทีเรียนี้ได้รับการยืนยันโดยการจำลองระบบโดยวิธีพลศาสตร์ของโมเลกุลซึ่งแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับกลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยเริ่มต้นด้วยโหมตการสั้นซึ่งสั้นสะเทือนแผ่นกราฟีนขนาดนาโนรอบอะตอมเป็นลิบถึงหนึ่งร้อยนาโนวินาที ตามด้วยโหมตการแทรกซึ่งแผ่นกราฟีนขนาดนาโนเลื่อนไปและแทรกตัวบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์และเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์กับเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นไขมันและบริเวณพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ ในที่สุดแผ่นกราฟีนขนาดนาโนจะทำการแยกฟอสโฟลิปิดจากเยื่อหุ้มเซลล์ในระหว่างขั้นตอนการสกัด

กลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยการแทรกและการสกัดไขมันของวัสดุผสมกราฟีนส่งผลให้เกิดความเครียดของเยื่อหุ้มเซลล์ที่สำคัญซึ่งนำไปสู่การลดลงของเซลล์ที่มีชีวิต การรบกวนสูงสุดของชั้นลิปิดไบเลเยอร์เกิดโดยการปิดกั้นด้วยแผ่นกราฟีนขนาดใหญ่ ซึ่งบริเวณขอบที่สัมผัสกันนี้มีบางส่วนที่มีความคมตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ขาดได้ส่งผลให้ใช้พลังงานในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ต่ำลง ไอออนลบของเซลล์แบคทีเรียก็มีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยากับบริเวณขอบของแผ่นกราฟีนโดยทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีจึงก่อให้เกิดความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรียในทางกลับกันธรรมชาติของแผ่นกราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติที่ชอบน้ำ จึงส่งผลให้สามารถยึดติดกับพื้นผิวเยื่อหุ้มเซลล์ได้โดยไม่ต้องเจาะชั้นลิปิดไบเลเยอร์ ในขณะที่ระดับการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สูงกว่าที่แผ่นกราฟีนออกไซด์ขนาดนาโน เนื่องจากมีความคมจำนวนมากอีกทั้งยังสามารถถ่ายโอนประจุได้ดีซึ่งนำไปสู่การทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย

นอกจากนี้ผลของแผ่นกราฟีนขนาดนาโนที่มีต่อความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรียสามารถศึกษาได้โดยการวัดการไหลของส่วนประกอบภายในเซลล์แบคทีเรียเมื่อสัมผัสกับแผ่นกราฟีนขนาดนาโน เมื่อเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับกราฟีนออกไซด์หรือรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ของตัวอย่างควบคุม ปฏิกิริยาระหว่างเซลล์แบคทีเรียกับบริเวณขอบคมของแผ่นกราฟีนขนาดนาโน ทำให้เกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกสูงกว่าแกรมลบ

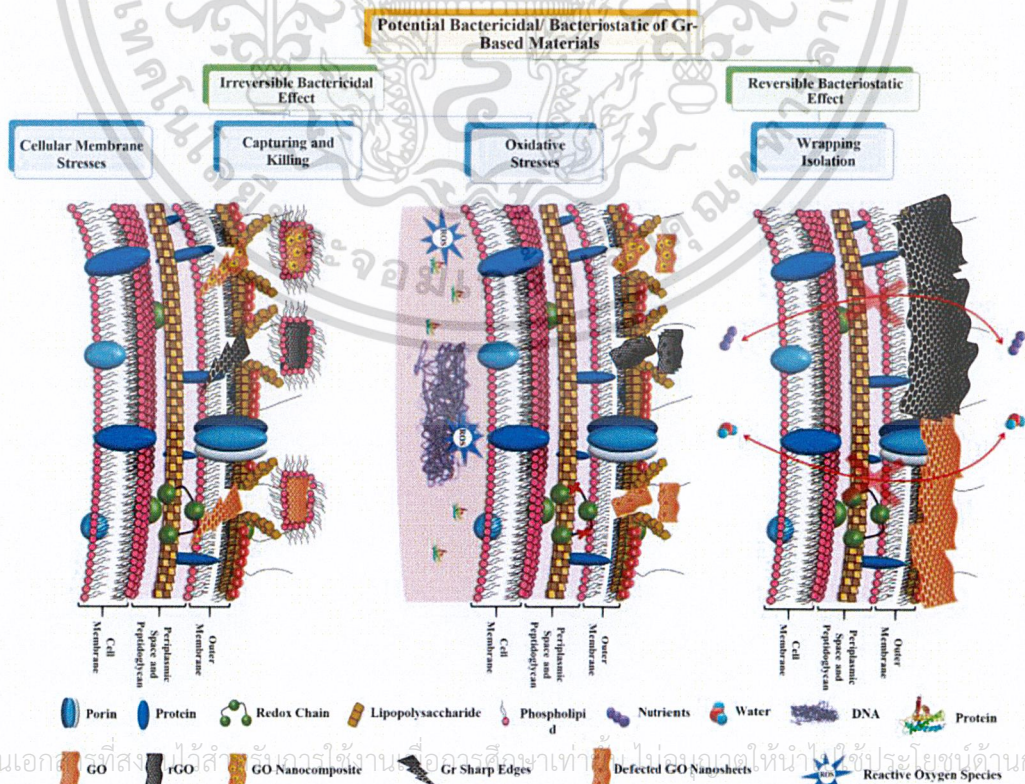
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Oxidative stress

มีกลไกเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมีและกายภาพของวัสดุที่มีแบคทีเรียเป็นส่วนประกอบ บทบาทสำคัญในกิจกรรมด้านเชื้อแบคทีเรียด้วยความเครียดออกซิเดทีฟ ผลของความเครียดออกซิเดทีฟส่งผลให้เกิดการออกซิเดชันของลิพิด, กรดนิวคลีอิกและโปรตีนซึ่งสามารถนำไปสู่การทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์ การยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์เกิดขึ้นผ่านการสร้างอนุมูลอิสระออกซิเจนที่ว่องไว (Reactive oxygen species ; ROS) ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงสภาวะรีดอกซ์ของเซลล์ได้ ความเครียดออกซิเดทีฟและการสร้างอนุมูลอิสระออกซิเจนที่ว่องไว (ROS) พบว่าเป็นกลไกหลักในการป้องกันหลักในเซลล์เมื่ออนุภาคถูกดูดซับ ความเครียดออกซิเดทีฟสามารถเร่งได้โดย NPs ผ่านการรบกวนของสมดุลระหว่างสารออกซิแดนต์และสารแอนตี้ออกซิแดนต์ภายในเซลล์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการรบกวนของสารต้านอนุมูลอิสระจากแบคทีเรีย โดย ROS มักจะรวมถึงอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH), อนุมูลเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ที่ทำลายส่วนประกอบของเซลล์โดยเฉพาะโปรตีนและ DNA

3. wrapping isolation

เมื่อมีแผ่นกราฟีนมาปิดล้อมแบคทีเรียส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียไม่ได้รับสารอาหารที่จะทำให้เซลล์เจริญเติบโตเนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ถูกปิดกั้นไว้ซึ่งส่งผลให้เซลล์ตายได้

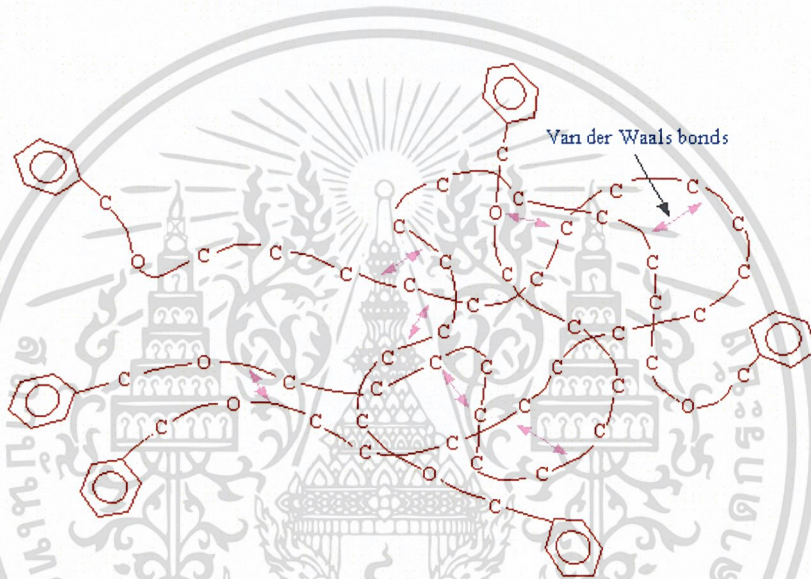


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 2.12 แสดงกลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียของวัสดุผสมกราฟีน [30]

2.6 การอบอ่อน [31]

เมื่อนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature ; T_g) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature ; T_m) หรือที่เรียกว่า “การอบอ่อน (annealing treatment)” เป็นระยะเวลาที่เพียงพอจะทำให้เกิดการปรับโครงสร้างส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้น

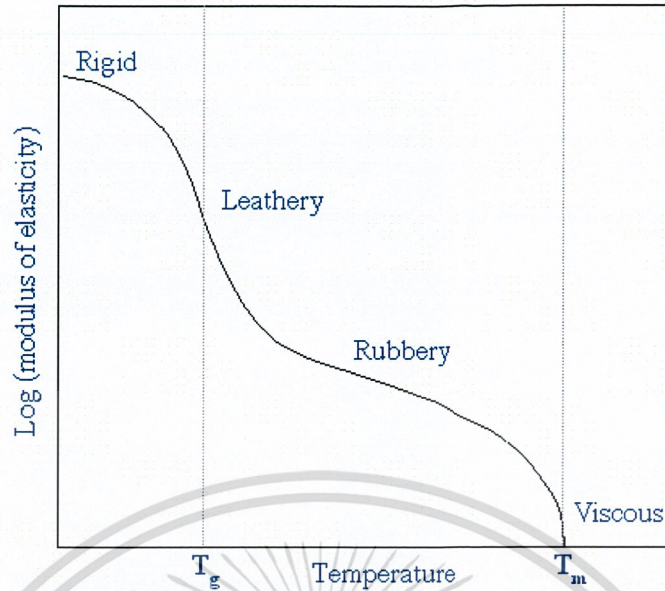
เทอร์โมพลาสติกทั่วไปมีพันธะโควาเลนต์เป็นแรงที่ยึดอะตอมภายในโมเลกุลเข้าด้วยกัน สายโซ่โมเลกุลที่ยาวขดและเกี่ยวพัน (Entanglement) กับโมเลกุลข้างเคียงและยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นแรงอ่อน ๆ ระหว่างโมเลกุล ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ (Entanglement) [31]

เมื่อเทอร์โมพลาสติกได้รับความร้อน แรง หรือ เกิดความเครียด แรงระหว่างโมเลกุลจะถูกทำลายลง ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถหมุนและเลื่อนไหลผ่านกันได้ ซึ่งการหมุนและเลื่อนไหลผ่านกันของโมเลกุลขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์และอุณหภูมิ อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์แสดงดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเทอร์โมพลาสติก [31]

สารอินทรีย์ทั่วไปโมเลกุลมีขนาดเล็ก น้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถผลึกหรืออยู่ในรูปของผลึกได้ แต่สำหรับพอลิเมอร์ขนาดของโมเลกุลยาว น้ำหนักโมเลกุลสูง จึงมีโอกาสที่จะอยู่ในรูปผลึกน้อยกว่า ส่วนของพอลิเมอร์ซึ่งโมเลกุลจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Unordered polymer) หรือไม่เป็นผลึกเรียกว่า “พอลิเมอร์อสัณฐาน” (Amorphous polymer) และ ส่วนของพอลิเมอร์ซึ่งโมเลกุลจัดเรียงตัวอย่างชัดเจนอย่างเป็นระเบียบ (Ordered polymer) เรียกว่า “พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก” (Crystalline polymer)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ มีดังต่อไปนี้

- ความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุล (Complexity) ความเป็นผลึกจะเกิดขึ้นได้ง่ายสำหรับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เช่น พอลิเอธิลีนซึ่งไม่มีหมู่แทนที่ที่เกะกะหรือกลุ่มของอะตอม ซึ่งอาจจะกีดขวางการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของสายโซ่
- อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) เมื่อถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีเวลาในการจัดเรียงตัวมากขึ้น โอกาสที่จะเกิดเป็นผลึกจึงมีมากกว่า
- การให้ความร้อน (Annealing) การให้ความร้อนกับพอลิเมอร์โครงสร้างอสัณฐานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย สามารถกระตุ้นให้โมเลกุลจัดเรียงตัวใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น
- องศาของพอลิเมอไรเซชัน (Degree of Polymerization) พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลยาวมากจะมีโอกาสเกิดเป็นผลึกได้ยากกว่า
- การเสียรูป (Deformation) การทำให้พอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่างกลาสทรานสิชันและอุณหภูมิหลอมเหลว เกิดการเสียรูปอย่างช้า ๆ เช่น การดึงจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ ยืดไม่เท่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังช่วยให้จัดระเบียบและต้องอ้างอิงถึงน้ำหนักของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ออกและจัดเรียงได้ชัดเจนมากขึ้น เกิดความเป็นผลึกได้ดีขึ้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. Hamza Al-Maamori และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของยางแข็ง (Ebonite) ที่ได้จากยางธรรมชาติจึงทำการเติมอนุภาคนาโนของคาร์บอนแบล็คลงไป แล้วทำการวัดคุณสมบัติการต้านทานแรงดึง ความหนาแน่น ความแข็งและคุณสมบัติของการ วัลคาไนซ์ของกลุ่มตัวอย่างที่มีกำมะถันต่างกันระหว่าง 18-36 pphr และคาร์บอนแบล็ค (18-26-30) pphr โดยผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนคาร์บอนแบล็คที่ดีที่สุดคือ 30 pphr ซึ่งให้ความสมดุลระหว่างคุณสมบัติการต้านทานแรงดึง ความเหนียวและความยืดหยุ่นและลดความเปราะในยางแข็ง [32]

L. Yi และคณะ (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการต้านทานการขีดขีดของพอลิเมอร์กึ่งผลึกซึ่งขึ้นอยู่กับสัณฐานวิทยาของผลึก เพื่อศึกษาผลของการอบอ่อนต่อพฤติกรรมการต้านทานการขีดขีดของพอลิแลคไทด์ (PLA) ได้ทำการทดสอบรอยขีดขีดบน PLA ซึ่งถูกอบอ่อนในเวลาที่แตกต่างกันพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นรวมถึงการก่อตัวของรอยขีด การแตกร้าวและการเสียรูปบริเวณพื้นผิวเกิดช้าลงอย่างเห็นได้ชัดหลังจากการเพิ่มเวลาการอบอ่อน ในระหว่างการอบอ่อนมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งทำให้มีความเป็นผลึกและความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นจากความสมบูรณ์ของสัณฐานวิทยาของผลึก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการต้านทานการเสียรูปของพื้นผิวและการแตกร้าวเมื่อได้รับแรงขีด [33]

Z. Tang และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของฟิลเลอร์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตและการยึดเกาะที่บริเวณพื้นผิว โดยได้เตรียมสารละลายกราฟีนออกไซด์ (GO) ในอะซิโตนด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายอย่างง่ายและปรับแต่ง GO ในสารละลายจากนั้นนำมาผสมกับยางไนไตรล์บนเครื่อง Two-roll mill ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและพื้นผิว พบว่า GO กระจายตัวในระดับนาโนในคอมโพสิตและมีการยึดเกาะที่พื้นผิวจะดีขึ้น ดังนั้นคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเติม GO อย่างไรก็ตามเนื่องจากกราฟีนมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่และมีแรงแวนเดอร์วาลส์ที่แข็งแกร่งในระหว่างชั้น กราฟีนและอนุพันธ์ของมันมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันอย่างรุนแรงในเมทริกซ์ของยาง ซึ่งทำให้คุณสมบัติของคอมโพสิตลดลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [34]

L. Zhenga และคณะ (2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันแก๊สไฮโดรเจน (HD) โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมคอมโพสิตของกราฟีนออกไซด์/ยางบิวทิล (GO/IIR) ขึ้นเป็นครั้งแรกโดยวิธีการผสมน้ำอย่างง่าย วิธีนี้ทำให้การกระจายตัวของ GO เป็นไปอย่างสม่ำเสมอเนื้อหลัก IIR และยังทำให้ GO และ IIR เกิดปฏิกิริยากันแข็งแรงด้วย เมื่อเพิ่ม GO เป็น 2 phr พบว่าความต้านทานการฉีกขาดและความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิต GO/IIR เพิ่มขึ้น 44% และ 102% ตามลำดับเมื่อเทียบกับ IIR บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติการป้องกันการเกิด HD เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้น GO เมื่อเพิ่ม GO เป็น 3 phr ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ HD ใน IIR ลดลง 46% [35]

D.C. Stanier และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยกราฟีนออกไซด์ขนาดนาโน (GO) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการเสริมแรงของฟิลเลอร์ โดยทดสอบแรงดึงของชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่อัตราความเครียดต่างกัน พบว่าโมดูลัสของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแม้ในการเติมสารตัวเติมในปริมาณต่ำ ซึ่งยืนยันการเกิดปฏิกิริยาที่แข็งแรงระหว่าง GO และยางธรรมชาติ คุณสมบัติความยืดหยุ่นจะถูกตรวจสอบผ่านการทดสอบการคลายตัวและการให้แรงในอัตราความเครียดต่างกัน แสดงให้เห็นว่าโมดูลัสของยังเพิ่มขึ้นตามอัตราความเครียดและการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ GO ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งกล่าวได้ว่าการเติม GO สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้เช่นเดียวกับคาร์บอนแบล็คหรือท่อนาโนคาร์บอนแม้ใช้ในปริมาณที่ต่ำกว่า [36]

K. ounsap และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาสมบัติเชิงกลและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติผสม โดยทำการศึกษาผลของการเติมซัลเฟอร์ในปริมาณต่าง ๆ และอุณหภูมิในการอบอ่อน ด้วยวิธีการผสมและเทขึ้นรูปแบบลาเท็กซ์อย่างง่าย โดยทำการคงที่ปริมาณน้ำยางธรรมชาติ ภายใต้การเติมซัลเฟอร์ในปริมาณต่าง ๆ และตามด้วยกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากผลการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซัลเฟอร์ที่เติมลงไป เช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิในการอบอ่อน ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมคือการเติมซัลเฟอร์ลงไป 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะทำให้ยางธรรมชาติผสมมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมซึ่งทำการทดสอบกับแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ แกรมบวกและแกรมลบ ผลที่ได้พบว่าแผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และแผ่นยางธรรมชาติผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดได้เป็นอย่างดี [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 1) ยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex; NRL) ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักต่อ น้ำหนักชนิด High ammonia (60% DRC, HA)
- 2) สารแขวนลอยซัลเฟอร์ (Sulphur; S₈) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก
- 3) ผงกราไฟต์ (Graphite) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma-Aldrich Pte,Ltd
- 4) โซเดียมไนเตรท (Sodium nitrate; NaNO₃) ความบริสุทธิ์ 99.995 เปอร์เซ็นต์ เกรด วิเคราะห์ Sigma-Aldrich Pte,Ltd
- 5) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H₂SO₄) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S
- 6) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate; KMnO₄) ความบริสุทธิ์ 99.0 เปอร์เซ็นต์ เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท Thermo Fisher Scientific
- 7) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H₂O₂) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent S.A.S
- 8) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher scientific.
- 9) น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) บีกเกอร์ (Beaker) บริษัท DURAN
- 2) กระบอกตวง (Cylinder) บริษัท HIRSCHMANN
- 3) ขวดก้นกลม (Round bottom flask)
- 4) ไมโครปิเปต (Micropipettes) บริษัท NICHIRYO
- 5) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
- 6) คีมคีบสาร (Forceps)
- 7) ช้อนตักสาร (Spatula)
- 8) แบบพิมพ์เทขึ้นรูป ขนาด 6 x 9.5 เซนติเมตร
- 9) ตู้ดูดควัน (Fume Hood) บริษัท FLEXLAB
- 10) ตู้อบลมร้อน (Oven) บริษัท MEMMERT
- 11) เครื่องชั่งแบบละเอียด บริษัท METTLER TOLEDO
- 12) เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrers) บริษัท HARMONY รุ่น HTS-1003
- 13) เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (Centrifuge) บริษัท THERMO SCIENTIFIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของวิทยาลัยอาชีวศึกษาสุพรรณบุรี

10) ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น (ทำซ้ำ 5 รอบ)

11) รินสารละลายด้านบนทิ้งออก จะได้สารละลายของเหลวคล้ายโคลนลักษณะสีน้ำตาลเข้ม ก็จะได้สารแขวนลอยกราฟต์ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

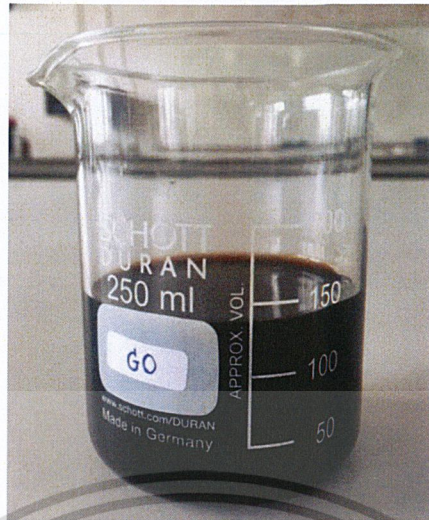


รูปที่ 3.1 สารแขวนลอยกราฟต์ออกไซด์

3.3.1.2 การเตรียมกราฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีการใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonication)

- 1) นำสารละลายกราฟต์ออกไซด์มา 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดสีคอ
- 2) เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางไว้ในตู้อัลตราโซนิก (Ultrasonic) ทำการโซนิเคชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3) นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อแยกกราฟต์ออกไซด์ที่เหลืออยู่ ออกจากสารแขวนลอยกราฟต์ออกไซด์ด้วยความเร็วรอบ 7000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
- 4) เทสารแขวนลอยออกจากหลอดเซนตริฟิวส์จะได้สารแขวนลอยกราฟต์ออกไซด์ อยู่ในลักษณะสีน้ำตาลเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์

3.3.2 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต

1) เตรียมน้ำยางธรรมชาติ/สารแขวนลอยซิลเฟอร์ที่ปริมาณคงที่(5.00 wt%)/สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ/น้ำกลั่น ตามเงื่อนไขที่กำหนดในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขในการขึ้นรูปแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต

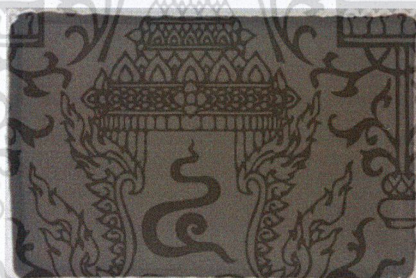
ชื่อตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำยาง (mL)	ปริมาณซิลเฟอร์ (mL)	ปริมาณ GO (mL)	ปริมาณ GO (phr)	ปริมาณน้ำกลั่น (mL)
NR	RT	7.00	0.00	0.00	-	0.00
NR/S		7.00	0.42	0.00	-	0.00
NR/GO_1.58 wt%		7.00	0.00	7.00	0.0180	0.00
NR/S/GO_0.34 wt%		7.00	0.42	1.50	0.0039	5.50
NR/S/GO_0.68 wt%		7.00	0.42	3.00	0.0077	4.00
NR/S/GO_1.13 wt%		7.00	0.42	5.00	0.0129	2.00
NR/S/GO_1.58 wt%		7.00	0.42	7.00	0.0180	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 2) ผสมลงในบีกเกอร์ขนาดเล็กและปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 3) เทลงในแม่แบบพิมพ์พลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด 6 × 9.5 เซนติเมตร

- 4) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง
- 5) เมื่อแห้งแล้วแกะออกจากแม่แบบ

หมายเหตุ

- 1) NR ย่อมาจาก แผ่นยางธรรมชาติ
- 2) NR/S ย่อมาจาก แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์
- 3) NR/GO_1.58 wt% ย่อมาจาก แผ่นยางธรรมชาติผสมกราฟีนออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก
- 4) NR/S/GO_0.34 wt% ย่อมาจาก แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก
- 5) NR/S/GO_0.68 wt% ย่อมาจาก แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก
- 6) NR/S/GO_1.13 wt% ย่อมาจาก แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนัก
- 7) NR/S/GO_1.58 wt% ย่อมาจาก แผ่นยางธรรมชาติผสมซัลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

3.3.3 การเตรียมแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตเพื่อศึกษาผลของการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

- 1) เตรียมน้ำยางธรรมชาติ/สารแขวนลอยซัลเฟอร์ที่ปริมาณคงที่ (5.00 wt%)/สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณคงที่ (1.58 wt%)/น้ำกลั่น ตามเงื่อนไขที่กำหนดในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการบออ่อนแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ชื่อตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณ น้ำยาง (mL)	ปริมาณ ซัลเฟอร์ (mL)	ปริมาณ GO (mL)	ปริมาณ น้ำกลั่น (mL)
NR	100	7.00	0.00	0.00	0.00
NR/S		7.00	0.42	0.00	0.00
NR/GO_1.58 wt%		7.00	0.00	7.00	0.00
NR/S/GO_1.58 wt%		7.00	0.42	7.00	0.00

หมายเหตุ : สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์มีความเข้มข้น 7.7 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

- 2) ผสมลงในบีกเกอร์ขนาดเล็กและปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
- 3) เทลงในแม่แบบพิมพ์พลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด 6 × 9.5 เซนติเมตร
- 4) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง
- 5) เมื่อแห้งแล้วแกะออกจากแม่แบบ
- 6) นำยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็น 4 ชั่วโมง
- 7) นำออกจากตู้อบแล้วนำมาพักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต หลังการบออ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

3.4.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์และความรู้เกี่ยวกับวิจาาระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ [38-39]

3.4.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared; FT-IR)

เทคนิค FT-IR Spectroscopy ย่อมาจาก Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นเทคนิคการกระเจิงแสงด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันคร่าว ๆ ในสาร โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลในตัวเครื่อง เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของสารเช่นเดียวกับเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี ข้อดีคือเป็นเทคนิคที่สามารถตรวจวัดสารที่มีความเป็นฟลูออเรสเซนต์ได้ดี แต่เป็นเทคนิคที่ต้องสัมผัสสารโดยตรง นิยมใช้ในการตรวจสอบสารเสพติด สารระเบิด สารตั้งต้น ฯลฯ เช่นเดียวกับเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีเนื่องจากมีความรวดเร็วในการออกผลและถูกต้องแม่นยำ [40]

3.4.3 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectrometer)

เป็นเครื่องวิเคราะห์เพื่อศึกษาเชิงโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันด้วยปรากฏการณ์การกระเจิงแสงของปรากฏการณ์รามานของสารตัวอย่างเพื่อหาค่าประกอบโครงสร้างของวัตถุนั้น ๆ ว่าประกอบด้วยสารใดและมีโครงสร้างเป็นอย่างไร โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Dispersive Raman Spectroscopy สามารถแสดงตำแหน่งของสารเคมีแต่ละชนิดได้ โดยมีความสามารถในการแยกในแนวลึก (Confocal depth resolution) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 ไมครอน [41]

3.4.4 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของ

สารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในปัจจุบันได้รับการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง มีความไวมากขึ้น ให้ผลลัพธ์ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ควบคุมกับเครื่องมือในการวิเคราะห์ และการพ่วงต่อกับเทคนิคอื่น ๆ ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น [42]

3.4.5 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Gravity Analysis ; TGA)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือการระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันหรือปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) [43]

3.4.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ กำลังขยาย 20 - 800,000 เท่า มีเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectrometer ; EDS) สามารถศึกษาชนิด ปริมาณและการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุหรือสารมลทินบนพื้นผิวของวัสดุที่นำมาศึกษาได้ เครื่อง SEM สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ Boron (B) ถึง Uranium (U) โดยการวิเคราะห์สามารถแสดงผลเป็นชนิดและปริมาณของธาตุ รวมถึงสามารถทำ mapping ได้อีกด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงและพัฒนางานวิจัย งานในกระบวนการผลิต งานวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ งานแก้ไขปัญหาอุตสาหกรรมและงานควบคุมคุณภาพของวัสดุได้เป็นอย่างดี [44-45]

3.4.7 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer ; EDS)

หลักการการทำงานอยู่ที่การกระตุ้นวัตถุตัวอย่างโดยอนุภาคพลังงานสูงอันได้แก่อนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งจะถูกปล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-ray tube) อนุภาคจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่มาอย่างรวดเร็วมีพลังงานจลน์สูง เมื่ออนุภาคนี้อันเข้ามาในอะตอมของวัตถุตัวอย่างบางส่วนก็จะมีโอกาสที่จะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม ในการชนนี้ก็จะถ่ายทอดพลังงานให้แก่

อิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและโดยทั่วไปมักจะสูงมากพอที่จะหลุดออกไปจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าก็จะตกลงมาอยู่แทนที่ในการตกลงมาอยู่ชั้นต่ำกว่านี้อิเล็กตรอนก็จะคายพลังงานที่มีอยู่มากเกินระดับที่ต้องการออกไป พลังงานที่คายออกมาจะอยู่ในรูปของรังสีเอ็กซ์เฉพาะ (Characteristic x-ray) ซึ่งจะบอกได้ว่าวัตถุตัวอย่างมีองค์ประกอบของธาตุใดบ้าง เนื่องจากแต่ละธาตุมีรังสีเอ็กซ์เฉพาะที่ไม่เหมือนกัน สามารถตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ในเวลาอันรวดเร็วและตรวจได้คราวละหลายๆธาตุพร้อมกัน นอกจากนี้ยังไม่ทำลายวัตถุตัวอย่างหรือทำให้วัตถุตัวอย่างสูญเสียสภาพเดิมและสามารถใช้วัตถุตัวอย่างในสภาพของแข็งได้ ดังนั้นเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS (SEM-EDS) ก็จะทำให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างได้ละเอียดและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น [46]

3.4.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy ; TEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก เครื่องจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (อยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงของอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอร์ับ (Projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้ [47]

3.4.9 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine ; UTM)

เป็นเครื่องทดสอบแรงตามมาตรฐาน ASTM D882 ให้แรงทดสอบคงที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่าง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาหรือสิทธิบัตรของ บริษัท อีทีที จำกัด ไม่ควรใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงกระทำของวัสดุ ทั้งแรงดึง แรงอัด แรงดัดขวางและแรงเฉือน [48]

โดยการทดสอบของโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ซึ่งวัดสมบัติด้านทานแรงดึงของวัสดุ เป็นตัวบ่งบอกความแข็งแรงและความสามารถในการทนรับแรงดึงของวัสดุจนขาดในระยะเวลาสั้น ๆ ด้วยอัตราการดึงคงที่ โดยเตรียมชิ้นงานและกำหนดสถานะเครื่องทดสอบดังนี้

- ขนาดชิ้นงาน	10 × 70	มิลลิเมตร
- ความเร็วในการดึง (Cross head speed)	250	มิลลิเมตรต่อนาที
- น้ำหนักสูงสุดที่รับได้ (Load cell)	100	นิวตัน
- ค่าแรงที่เครื่องรับได้	0.5	นิวตัน
- ระยะห่างของตัวจับชิ้นงาน (Gauge length)	30	มิลลิเมตร
- จำนวนชิ้นงานทดสอบ	5	ชิ้นต่อชิ้นงาน

โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และ ร้อยละของความเครียด (%Strain) รวมถึงค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ค่าการคงรูป (Stiffness) ค่าความเค้นสูงสุด (Stress at maximum load) และค่าแรงดึงที่จุดขาด (Load at break) แล้วนำมาใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาความแข็งแรงเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต

3.4.10 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-Bacterial test)

ทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต โดยใช้วิธี Agar disc diffusion โดยจะวิเคราะห์ผลการทดลองจากการเกิดโซนยับยั้ง (Inhibition Zone) บนจานเลี้ยงเชื้อ โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus* (แกรมบวก) และ *Escherichia coli* (แกรมลบ) โดยเตรียมชิ้นงานขนาด 10 x 10 มิลลิเมตร [49]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

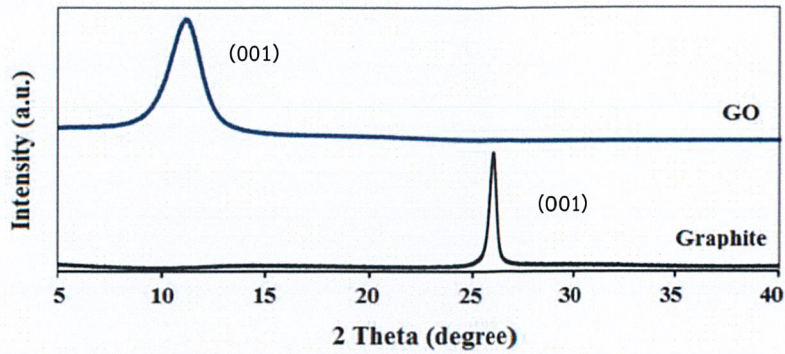
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์จากกราฟาไฟต์ โดยใช้กระบวนการของแฮมเมอร์ (Hummer's method) และการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic) จากนั้นทำการเตรียมแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟออร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต โดยที่ซิลเฟออร์มีปริมาณคงที่ (5.00 wt%) และกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD), ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR), พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน (Raman spectrometer), การดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrometer), สมบัติเชิงความร้อน (TGA), ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (EDS), ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM), สมบัติเชิงกล (UTM) และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Anti-bacterial testing) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์กราฟีนออกไซด์

4.1.1 ผลการตรวจสอบผลึกและออสัณฐาน

เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ กันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูลองค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่างและลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึกขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึกและความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง [1] ผลการวิเคราะห์ผลึกและออสัณฐานของกราฟาไฟต์และกราฟีนออกไซด์ (GO) แสดงดังรูปที่ 4.1

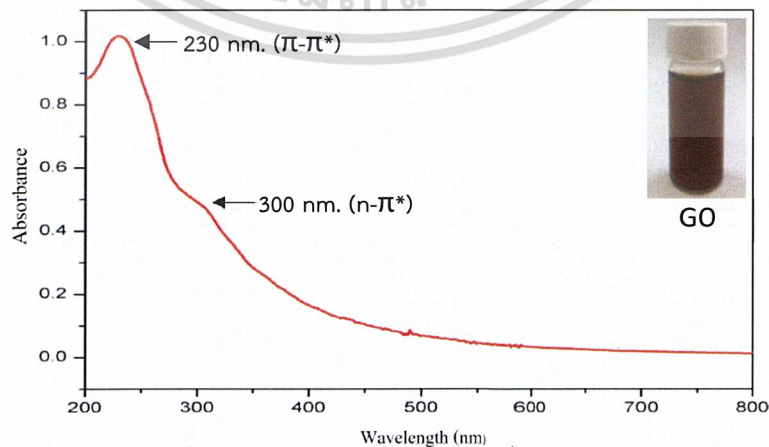


รูปที่ 4.1 XRD Pattern ของกราไฟต์ (Graphite) และกราฟีนออกไซด์ (GO)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 จะพบพีคเอกลักษณ์ของกราไฟต์มีมุมการเลี้ยวเบนเท่ากับ $2\theta = 26^\circ$ มีระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) เท่ากับ 0.35 นาโนเมตร และกราฟีนออกไซด์มีมุมการเลี้ยวเบนเท่ากับ $2\theta = 11^\circ$ ระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ 0.77 นาโนเมตร [2-3] กราฟีนออกไซด์มีระยะห่างระหว่างระนาบสูงกว่ากราไฟต์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการการสังเคราะห์ (Hummer’s method) โดยมีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ด้วยกรดเข้มข้นคือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) หลังจากทำปฏิกิริยาทำให้มีหมู่ฟังก์ชันคือ หมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) หมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) หมู่คาร์บอนิล ($-C=O$) และหมู่อีพอกซี ($C-O$) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในระนาบของกราไฟต์ [4] ทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่า 2θ ลดลงไปทางซ้ายมือ อีกทั้งจะพบพีคเอกลักษณ์ของกราไฟต์ที่ตำแหน่ง $2\theta = 26^\circ$ จึงตรวจสอบได้จากสูตร $n\lambda = 2d \sin \theta$ ยืนยันได้ว่ากราไฟต์ได้เปลี่ยนเป็นกราฟีนออกไซด์สมบูรณ์แล้ว [5]

4.1.2 ผลการตรวจสอบการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต-แสงขาว

ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO) ด้วยเทคนิค UV-Visible spectrophotometry (UV-Vis) ได้ผลดังรูปที่ 4.2



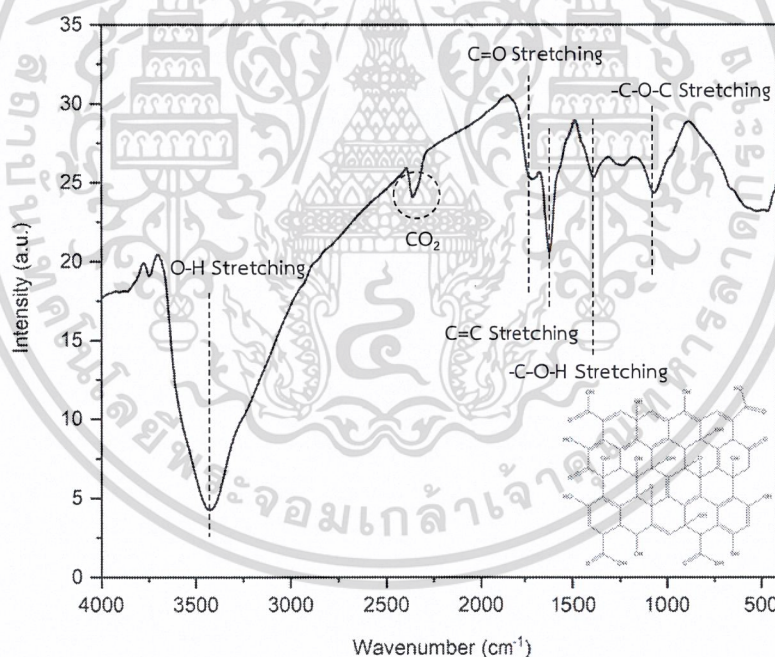
รูปที่ 4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของกราฟีนออกไซด์ (GO) และภาพถ่ายสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสง จากรูปที่ 4.2 จะพบพีคเอกลักษณ์การดูดกลืนแสงของ กราฟีนออกไซด์ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 230 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะ จาก $\pi-\pi^*$ สามารถขึ้นได้ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 220 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากโมเลกุลที่มีพันธะคู่ ต่อเนื่อง (Conjugated double bond) ทำให้อิเล็กตรอนใน π ออบิทัลหนึ่งสามารถกระจายไปยัง π ออบิทัลอื่นที่มีอยู่ในโมเลกุลนั้นได้ส่งผลให้พันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน ($-C=C$) อ่อนแอลง ทำให้พลังงานในการทรานซิชันลดลงและยังดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 300 นาโนเมตร เป็นการเปลี่ยนสถานะจาก $n-\pi^*$ เกิดกับโมเลกุลที่มีทั้ง n (Non-bonding) และ π ออบิทัล ซึ่งได้แก่ สารประกอบคาร์บอกซิลิกหรือคีโตนที่มีหมู่คาร์บอนิล ($-C=O$)

4.1.3 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล

การวิเคราะห์ Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ กราฟีนออกไซด์ (GO) แสดงผลการศึกษาในรูปที่ 4.3



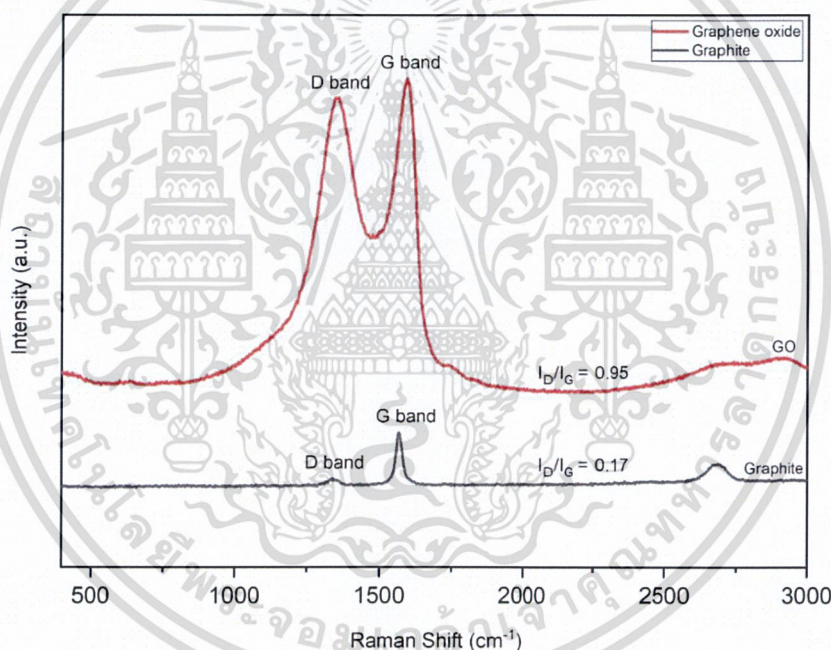
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟ FT-IR ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์

จากรูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญได้แก่ ช่วงเลขคลื่น ประมาณ 3200-3600 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของพันธะออกซิเจนต่อไฮโดรเจน (O-H Stretching) ช่วงเลขคลื่น ประมาณ 1720 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นยืดของคาร์บอนิลและคาร์บอกซิลิก (C=O stretching) ช่วง เลขคลื่นประมาณ 1630 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นยืดของพันธะ C=C (C=C Stretching) เกิดจากการสั่น ของวงอะโรมาติก ซึ่ง C=O Stretching และ C=C Stretching สัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนแสงของ

กราฟีนออกไซด์ที่ความยาวคลื่น 230 นาโนเมตรและ 300 นาโนเมตร ที่ช่วงเลขคลื่นประมาณ 1226 cm^{-1} เป็นการสั่นยืดของ C-O-H (C-O-H Stretching) และที่ประมาณ 1067 cm^{-1} เป็นการสั่นยืดของ C-O-C (C-O-C Stretching) เป็นการยืนยันหมู่ฟังก์ชันในกราฟีนออกไซด์ ดังแสดงในภาพโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ [3]

4.1.4 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน

เทคนิครามาน (Raman spectroscopy) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของสารโดยอาศัยหลักการทางแสงโดยที่สารแต่ละตัวจะมีลักษณะการกระเจิงแสงไม่เหมือนกัน เทคนิครามานเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่างและไม่สัมผัสสารโดยตรง โดยแสดงผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์ ดังรูปที่ 4.4



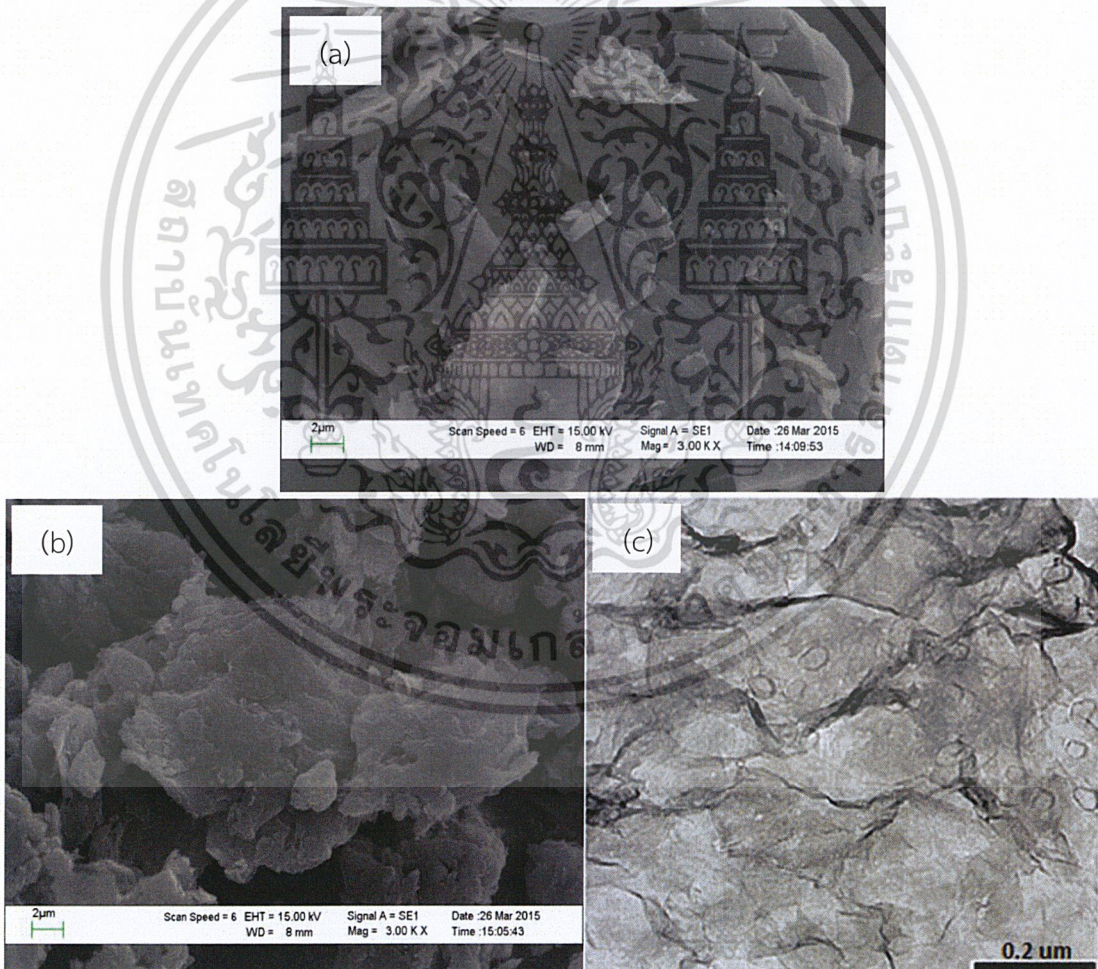
รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของเทคนิครามานเปรียบเทียบระหว่างกราฟไฟต์และกราฟีนออกไซด์ (GO)

จากรูปที่ 4.4 จะพบพีกเอกลักษณ์ของของกราฟไฟต์ที่ตำแหน่งพีก D band ประมาณ 1348 cm^{-1} และ G band ประมาณ 1590 cm^{-1} และกราฟีนออกไซด์แสดงตำแหน่งพีก D band ประมาณ 1340 cm^{-1} และ G band ประมาณ 1565 cm^{-1} แถบ D band เกิดจากข้อบกพร่องที่ขอบและระนาบของกราฟีนออกไซด์เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลและอีพอกซีเกาะอยู่ที่ขอบและระนาบของแผ่นกราฟีนออกไซด์และเกิดขึ้นจากการสั่นของ sp^3 ในขณะที่แถบ G band เกิดขึ้นจากการสั่นของอะตอมคาร์บอนที่ถูกยึดเหนี่ยวด้วย sp^2 [6-7] อัตราส่วนของ I_D/I_G แสดงถึงความบกพร่อง (Defect) และความไม่เป็นระเบียบ (Disorder) ของคาร์บอนในสเปกตรัม ซึ่งถ้าอัตราส่วนของ I_D/I_G มากจะแสดงถึงความไม่เป็นระเบียบขององค์ประกอบคาร์บอนที่สูง ค่า I_D/I_G ของกราฟไฟต์เท่ากับ 0.17

และกราฟีนออกไซด์เท่ากับ 0.95 แสดงว่ากราฟีนออกไซด์มีความไม่เป็นระเบียบของคาร์บอนสูงกว่ากราฟไฟต์ เนื่องจากช่วงความกว้างของซึ่งพีคบ่งบอกถึงความเป็นผลึก ถ้าช่วงความกว้างของพีคมาก (Board peak) จะแสดงถึงความเป็นผลึกต่ำ ซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ระยะห่างชั้นของกราฟไฟต์เพิ่มขึ้นจนเหลือแผ่นกราฟีนออกไซด์ชั้นเดียว (Monolayer) และขนาดของแผ่นลดลง ส่งผลให้เกิดความบกพร่องและความเป็นผลึกลดลง

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานในระดับจุลภาค

ทำการพิสูจน์ลักษณะสัณฐานวิทยาของสารตัวอย่างในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy) แสดงผลการศึกษาในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงภาพจากกล้อง (a) SEM ที่กำลังขยาย 3000X ของกราฟไฟต์ (b) SEM ของกราฟีนออกไซด์ที่กำลังขยาย 3000X และ (c) TEM ของกราฟีนออกไซด์

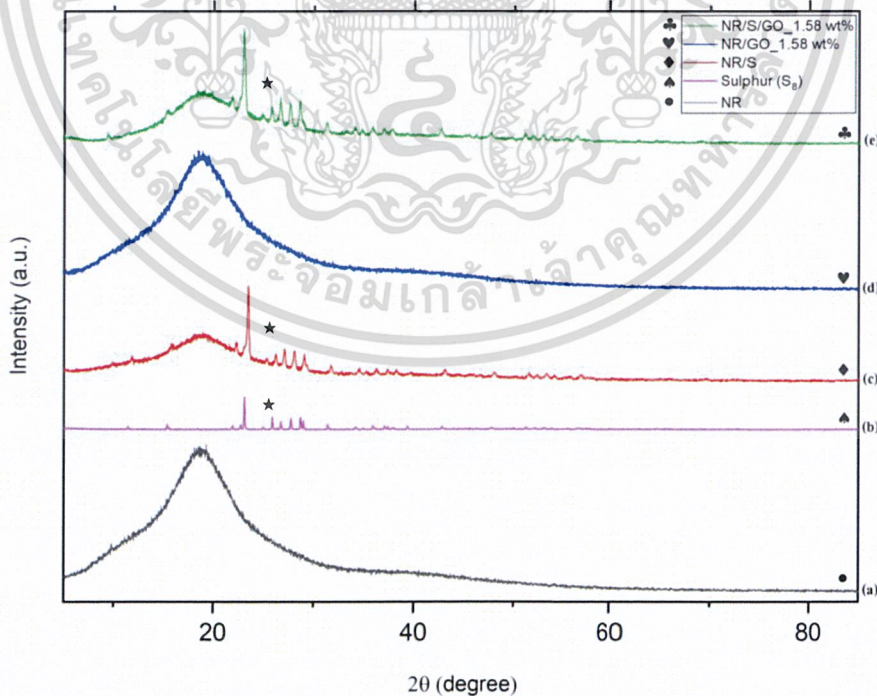
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อประโยชน์ทางการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 (a) แสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงกราฟไฟต์ พบว่ากราฟไฟต์มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความเป็นระเบียบ เรียงซ้อนทับกันอยู่ชั้น ๆ ในขณะที่ภาพ (b) พบว่ากราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นเกล็ดเล็ก ๆ อยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ที่บริเวณพื้นผิวมีความขรุขระ และภาพ (c) แสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่ากราฟีนออกไซด์เป็นแผ่นบางซึ่งสังเกตได้ว่ากราฟีนออกไซด์มีความโปร่งแสง [4] และมีขนาดไม่เท่ากันซึ่งเกิดจากกระบวนการการสังเคราะห์

4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต

4.2.1 ผลการตรวจสอบผลึกและอสัณฐาน

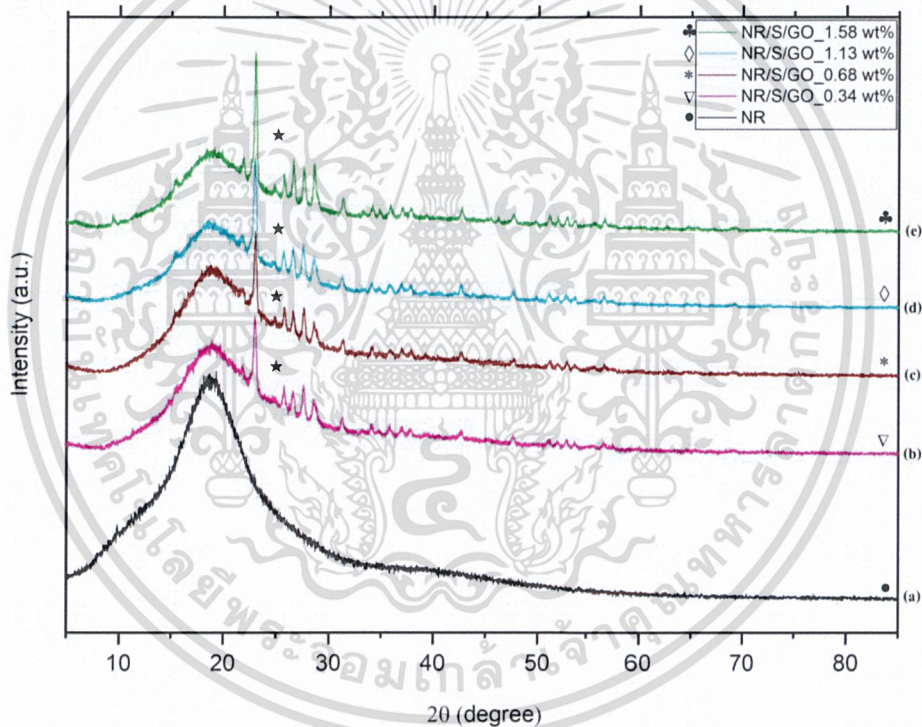
ผลการตรวจสอบผลึกและอสัณฐานของแผ่นยางธรรมชาติ, ซัลเฟอร์ (S₈), แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต, แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนักและแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ผลดังรูปที่ 4.6-4.7



รูปที่ 4.6 XRD Pattern ของ (a) NR (b) Sulphur (S₈) Standard [8] (c) NR/S (d) NR/GO_1.58 wt% และ (e) NR/S/GO_1.58 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 ผลการตรวจสอบผลึกและอสัณฐานของ (a) NR พบพีคการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 18.71° ซึ่งเป็นที่ที่เป็นเป็นแถบกว้าง (Broad peak) เนื่องจากการเลี้ยวเบนของยางธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (b) Sulphur (S_8) Pattern standard (RRUFF ID : R050006.1) พบพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ $23.1877, 25.9513, 26.8271, 29.0579, 31.5164, 34.2726, 37.1542, 51.3528$ และ 52.1532 [8] (c) NR/S พบพีคการเลี้ยวเบนของยางธรรมชาติที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 18.73° และพบพีคของซัลเฟอร์ที่ตำแหน่ง 2θ เดียวกันกับ Sulphur (S_8) XRD pattern [9] (d) NR/GO_1.58 wt% พบพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติแต่ไม่พบพีคของกราฟีนออกไซด์เพราะปริมาณของกราฟีนออกไซด์ที่ผสมลงในยางธรรมชาติน้อยเกินไปทำให้พีคของกราฟีนออกไซด์ถูกบดบัง (e) NR/S/GO_1.58 wt% พบพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติและซัลเฟอร์



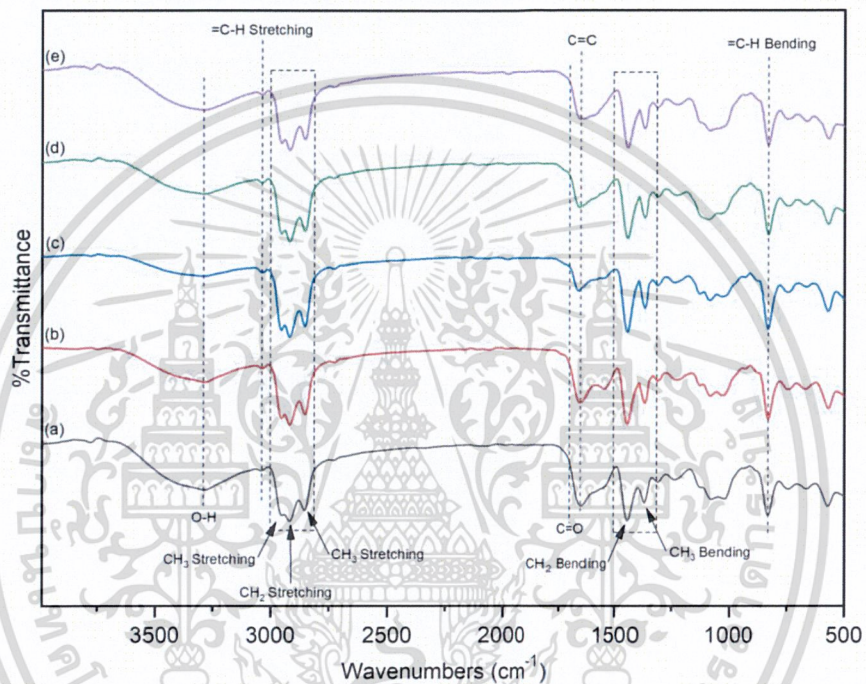
รูปที่ 4.7 XRD Pattern ของ (a) NR (b) NR/S/GO_0.34 wt% (c) NR/S/GO_0.68 wt% (d) NR/S/GO_1.13 wt% และ (e) NR/S/GO_1.58 wt%

จากรูปที่ 4.7 (b)-(e) พบพีคเอกลักษณ์ของซัลเฟอร์ และมีสัดส่วนของพีคซัลเฟอร์ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากความหนืดของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตในขั้นตอนการเตรียมไม่เท่ากันทำให้ซัลเฟอร์มีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล

การวิเคราะห์ Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบ หมู่ฟังก์ชันของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต จะใช้ FT-IR ชนิด ATR-FT-IR ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยไม่ต้องบด สามารถนำมาตรวจวิเคราะห์ได้ทันที ผลการศึกษาแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟ FT-IR เปรียบเทียบ (a) NR (b) NR/S (c) NR/GO_1.58 wt% (d) NR/S/GO_0.34 wt% และ (e) NR/S/GO_1.58 wt%

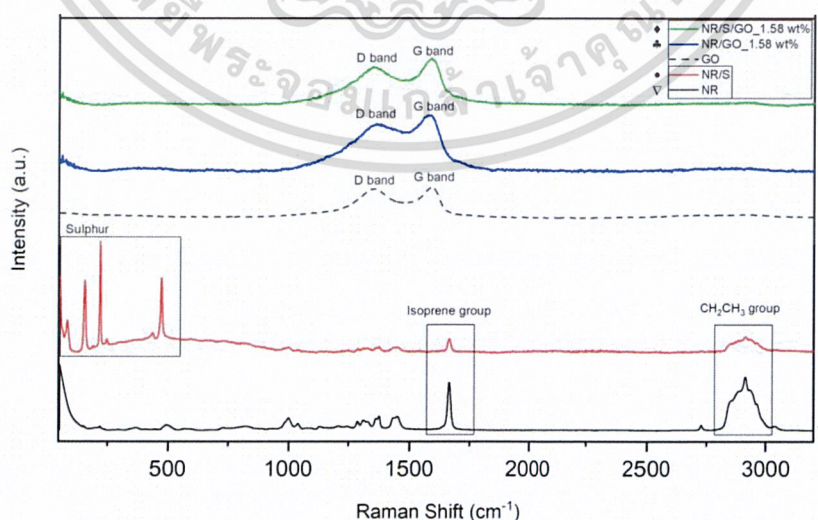
จากรูปที่ 4.8 แผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตแสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ ช่วงเลขคลื่นประมาณ 3285 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของพันธะออกซิเจนต่อไฮโดรเจน (O-H Stretching) เกิดจากความชื้นในอากาศ ช่วงเลขคลื่นประมาณ 3037 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นยืดของ =C-H (=C-H Stretching) ช่วงเลขคลื่นประมาณ 2953 cm^{-1} และ 2852 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นแบบยืดของ CH_3 (C-H Stretching of CH_3) ช่วงเลขคลื่นประมาณ 2918 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นยืดของ CH_2 (C-H Stretching of CH_2) ช่วงเลขคลื่นประมาณ 1720 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นยืดของพันธะ C=O (C=O Stretching) ซึ่งซ้อนทับกับช่วงเลขคลื่นประมาณ 1648 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นยืดของพันธะ C=C (C=C Stretching) ช่วงเลขคลื่นประมาณ 1443 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอของ CH_2 (C-H Bending of CH_2) ช่วงเลขคลื่นประมาณ 1370 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอของ CH_3 (C-H Bending of CH_3) และที่ช่วงคลื่น 832 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอของ =C-H (=C-H Bending) [3,10] ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สเปกตรัมรังสีอินฟราเรดของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต

Vibration modes	Wavenumber (cm ⁻¹)
O-H Stretching	3285
=C-H Stretching	3037
C-H Stretching of CH ₃	2953, 2852
C-H Stretching of CH ₂	2918
C=O Stretching	1720
C=C Stretching	1648
C-H Bending of CH ₂	1443
C-H Bending of CH ₃	1370
=C-H Bending	832

4.2.3 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิครามาน

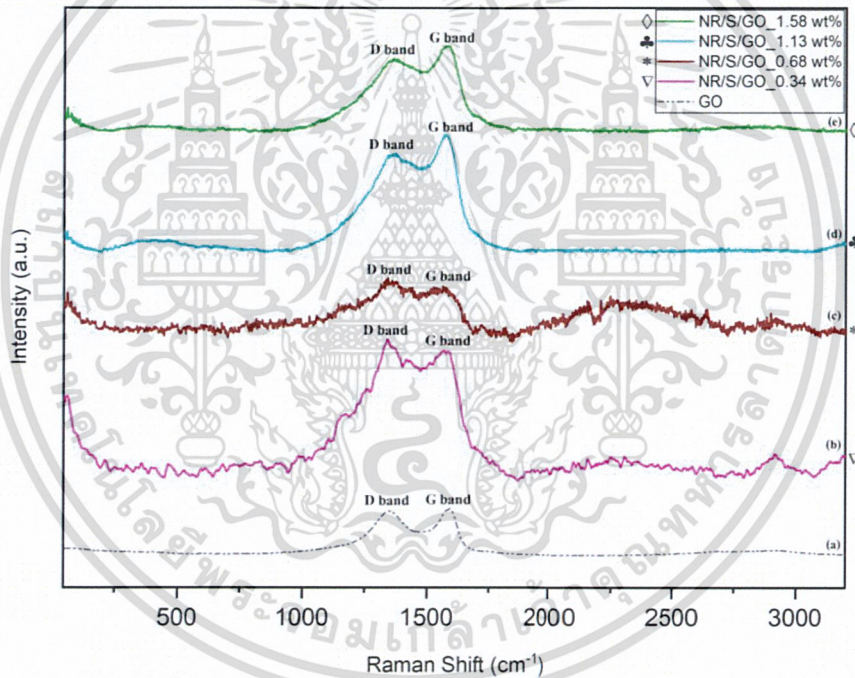
แสดงผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของยางธรรมชาติ, ซัลเฟอร์ (S₈), แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต, แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนักและแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.7-4.9



รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมของเทคนิครามานเปรียบเทียบ (a) NR (b) NR/S (c) GO (d) NR/GO_1.58 wt% และ (e) NR/S/GO_1.58 wt%

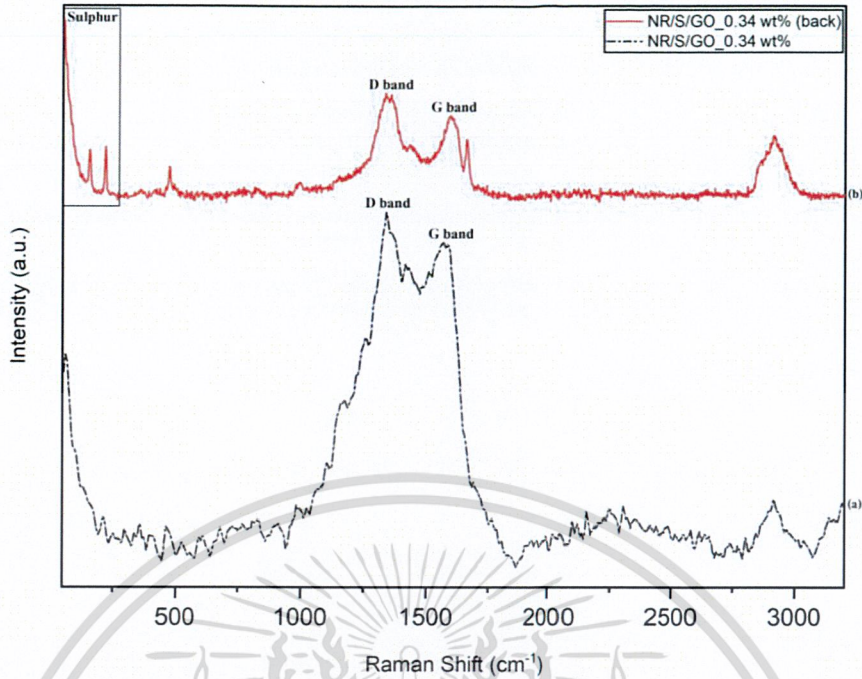
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบ (a) แผ่นยางธรรมชาติ กับ (b) แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต (a) พบพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติจะแสดงพีคของ Isoprene group 1665 cm^{-1} และพีคของ CH_2CH_3 group 2911 cm^{-1} เมื่อเติมซัลเฟอร์ลงไปใยยางธรรมชาติ (b) จะพบพีคของซัลเฟอร์เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 52 cm^{-1} 83 cm^{-1} 154 cm^{-1} และ 219 cm^{-1} ทำให้พีคของยางธรรมชาติมีความเข้มของพีคลดลงเนื่องจากสายโซ่โพลีไอโซพรีนมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ทำให้เกิดความบกพร่อง (Defect) ลดลง ซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (Crosslink) ระหว่างยางธรรมชาติกับซัลเฟอร์ และเมื่อใส่กราฟีนออกไซด์ลงไปใยยางธรรมชาติ (d) และ (e) จะพบพีคเอกลักษณ์รามานของกราฟีนออกไซด์ โดยที่ไม่พบพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติและซัลเฟอร์ เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ว่องไวต่อเทคนิครามานมากและมีความเข้มสูงทำให้พีคของกราฟีนออกไซด์บดบังพีคของยางธรรมชาติและซัลเฟอร์

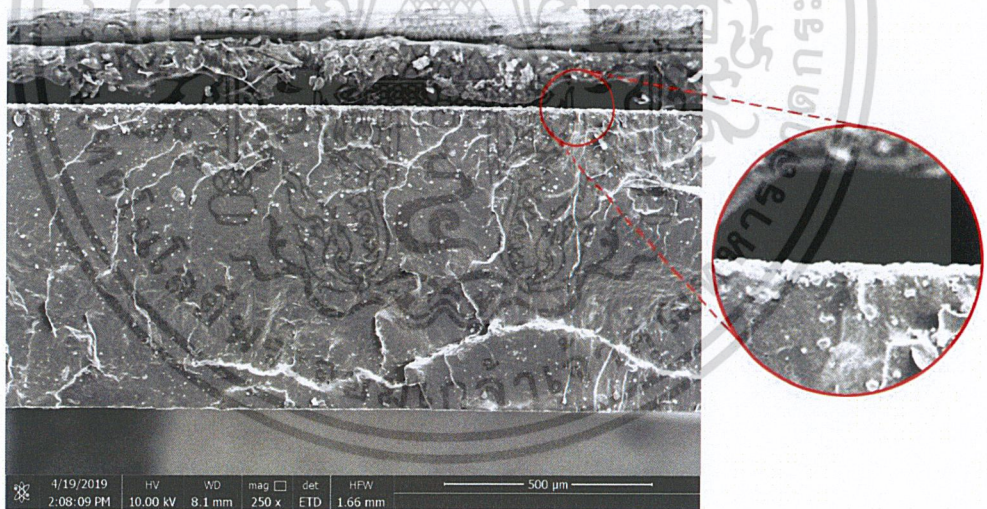


รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมของเทคนิครามานเปรียบเทียบ (a) GO (b) NR/S/GO_0.34 wt% (c) NR/S/GO_0.68 wt% (d) NR/S/GO_1.13 wt% และ (e) NR/S/GO_1.58 wt%

จากรูปที่ 4.10 (b)-(e) พบพีคเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ ที่กราฟ (b) และ (c) ยังพบพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติอยู่คือ Isoprene group ที่ซ้อนทับ (Overlap) กับพีค D band ของกราฟีนออกไซด์ที่ตำแหน่งประมาณ 1340 cm^{-1} สังเกตได้จากความเข้มของพีค D band ที่สูงกว่าพีค D band ของ (a) และพบพีค CH_2CH_3 group ที่ตำแหน่งประมาณ 2917 cm^{-1} และกราฟ (d) และ (e) ไม่พบพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติ เพราะกราฟีนออกไซด์ที่ใส่ใยยางธรรมชาติคอมโพสิตมีปริมาณสูง ทำให้ความเข้มของพีคกราฟีนออกไซด์สูงจึงบดบังพีคของยางธรรมชาติและซัลเฟอร์ไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมของเทคนิครามานเปรียบเทียบระหว่าง (a) NR/S/GO_0.34 wt% (ด้านบน) (b) NR/S/GO_0.34 wt% (ด้านล่าง)



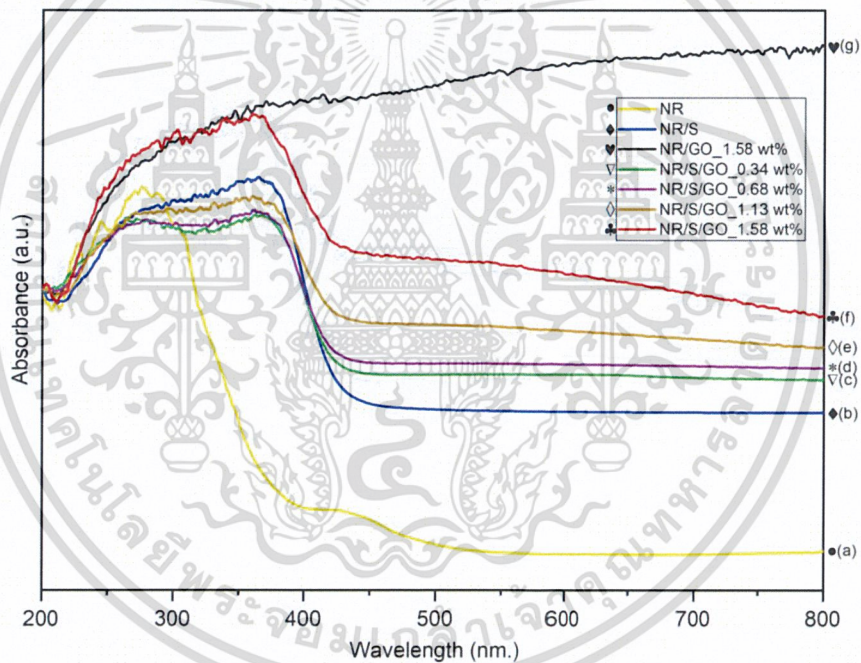
รูปที่ 4.12 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย 250X และแสดงภาพขยายบริเวณขอบด้านล่างของ NR/S/GO_0.34 wt%

จากรูป 4.11 แสดงสเปกตรัมของเทคนิครามานเปรียบเทียบระหว่างของ NR/S/GO_0.34 wt% (a) ด้านบน และ (b) ด้านล่าง พบพีคเอกลักษณ์ที่เหมือนกันได้แก่ พีคของกรราฟีนออกไซด์และพีค CH_2CH_3 group ของยางธรรมชาติ แต่ที่ด้านล่าง (b) พบพีคเอกลักษณ์ของซัลเฟอร์เนื่องจากเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าที่ขอบด้านล่างของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กรราฟีนออกไซด์คอมโพสิต มีซัลเฟอร์รวมตัวกันไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดแบบลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

เป็นจำนวนมาก ตามรูปที่ 4.12 ในภาพขยายจะสังเกตเห็นซัลเฟอร์สีเขารวมตัวกันอยู่ที่ขอบของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต ซึ่งเกิดจากการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นทำให้น้ำยางธรรมชาติมีความหนืดต่ำ ซัลเฟอร์จึงเกิดการตกตะกอนก่อนที่น้ำยางธรรมชาติจะแข็งตัว เมื่อสารผสมแห้งจึงพบซัลเฟอร์บริเวณด้านล่างของแผ่นยางคอมโพสิต

4.2.4 ผลการวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์การดูดกลืนแสง

การวิเคราะห์ UV-Vis spectroscopy ที่ใช้ในการวิเคราะห์แผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต จะใช้ UV-Vis spectrophotometer ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างของแข็งได้ สามารถนำมาตรวจวิเคราะห์ได้ทันที ผลการศึกษาแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเปรียบเทียบ (a) NR (b) NR/S (c) NR/GO_1.58 wt% (d) NR/S/GO_0.34 wt% (e) NR/S/GO_0.68 wt% (f) NR/S/GO_1.13 wt% (g) NR/S/GO_1.58 wt%

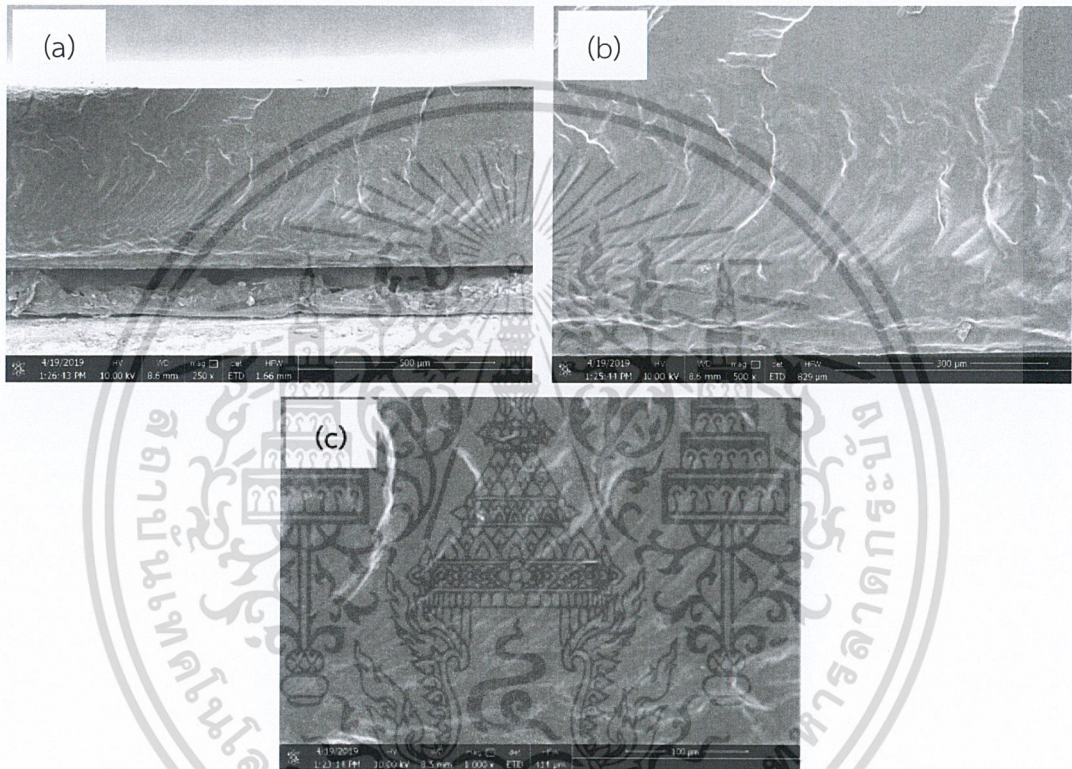
จากรูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของ (a) แผ่นยางธรรมชาติ ดูดกลืนช่วงแสงขาว (ความยาวคลื่น 380-750 นาโนเมตร) น้อยมากเพราะแผ่นยางธรรมชาติมีลักษณะโปร่งแสง ชุ่น ไม่มีสี (b) แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต ดูดกลืนแสงขาวเพิ่มขึ้นเพราะมีลักษณะทึบแสง (c) แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักคอมโพสิต ดูดกลืนแสงขาวสูงสุด

เพราะมีลักษณะทึบแสงและมีสีดำ และ (d-g) แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.34, 0.64, 1.13 และ 1.58 โดยน้ำหนักคอมโพสิต ดูดกลืนแสงขาวเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้สีดำขึ้นตามลำดับ

4.2.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานในระดับจุลภาค

ผลการวิเคราะห์ลักษณะภาพตัดขวาง (Cross section) ทำการพิสูจน์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของสารตัวอย่างในระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) โดยทำการศึกษาภาพตัดขวาง แสดงผลการศึกษาในรูปที่ 4.14-4.17

4.2.5.1 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติ

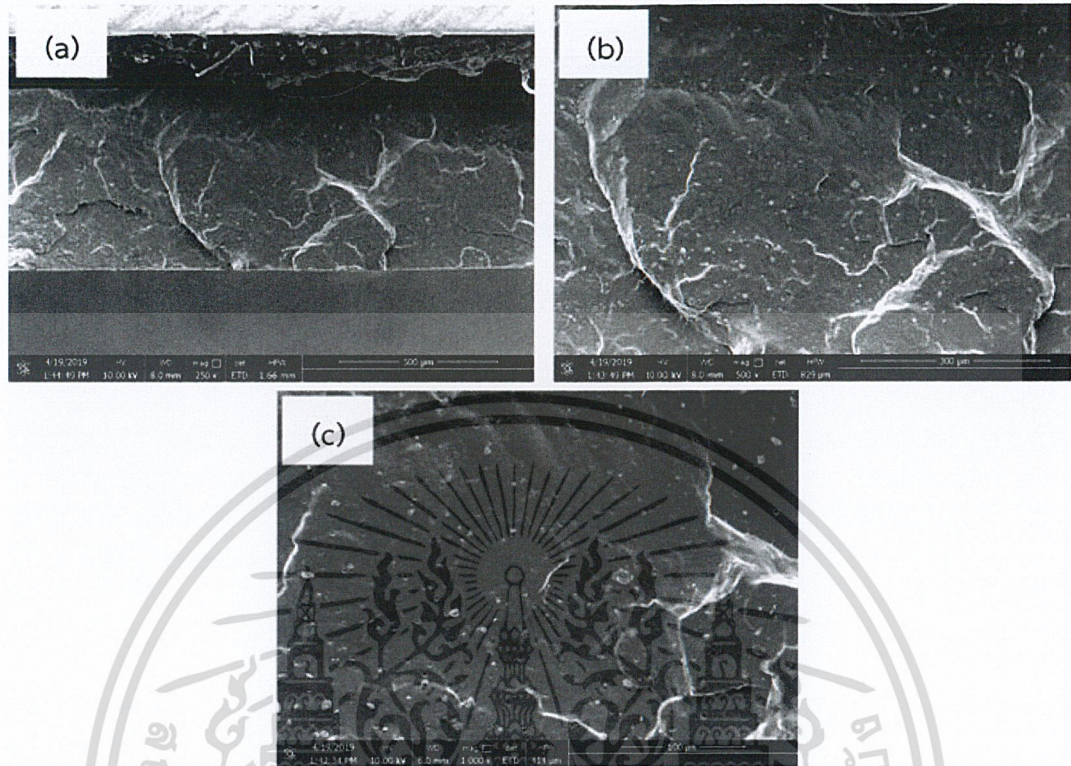


รูปที่ 4.14 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของ NR กำลังขยาย (a) 250X (b) 500X (c) 1000X

ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) ของแผ่นยางธรรมชาติในรูปที่ 4.14 พบว่าภาพตัดขวางมีลักษณะผิวขรุขระที่เกิดจากการหักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว แต่จะไม่พบอนุภาคใด ๆ ฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

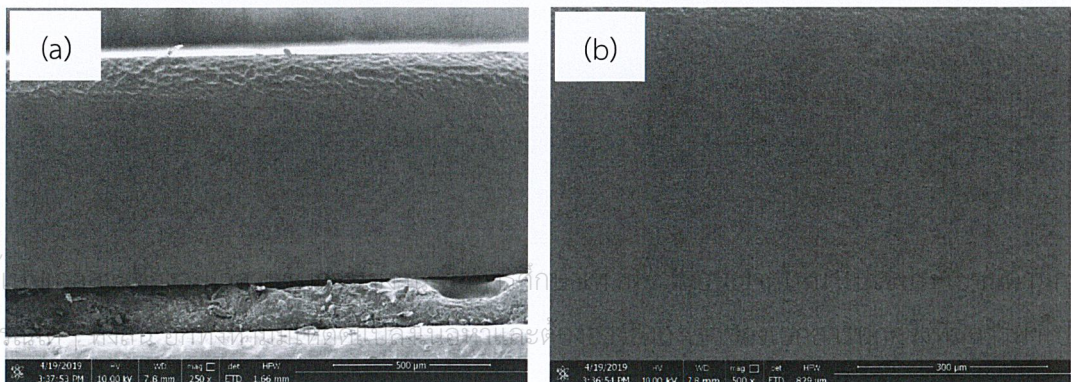
4.2.5.2 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต

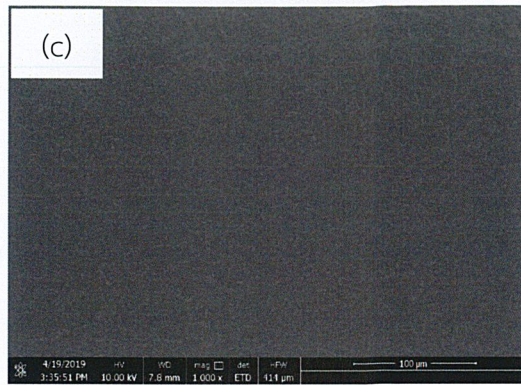


รูปที่ 4.15 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของ NR/S กำลังขยาย (a) 250X (b) 500X (c) 1000X

ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) เมื่อเติมซัลเฟอร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในรูปที่ 4.15 ลงในแผ่นยางธรรมชาติ พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณภาพตัดขวางมีลักษณะขรุขระและมีอนุภาคของซัลเฟอร์แทรกตัวอยู่ในเนื้อยางธรรมชาติ มีการกระจายตัวของซัลเฟอร์ที่ดีในเนื้อยางธรรมชาติคอมโพสิต

4.2.5.3 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต

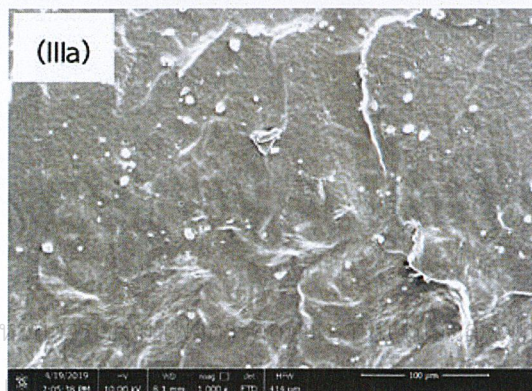
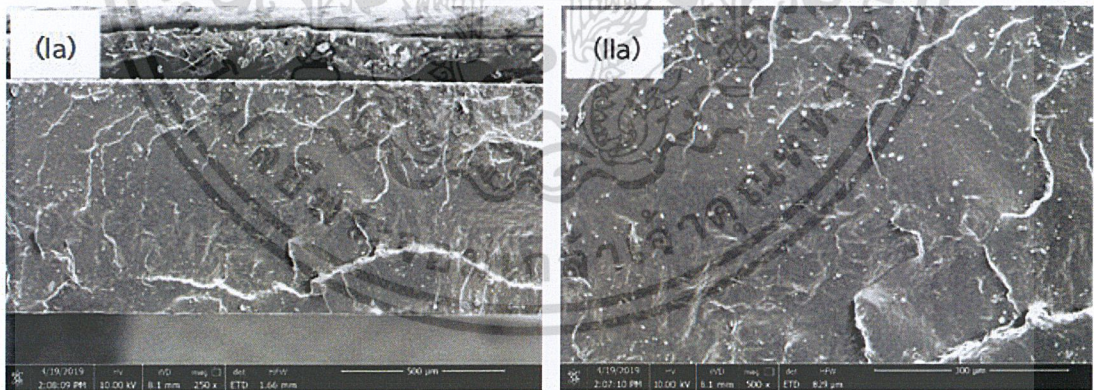




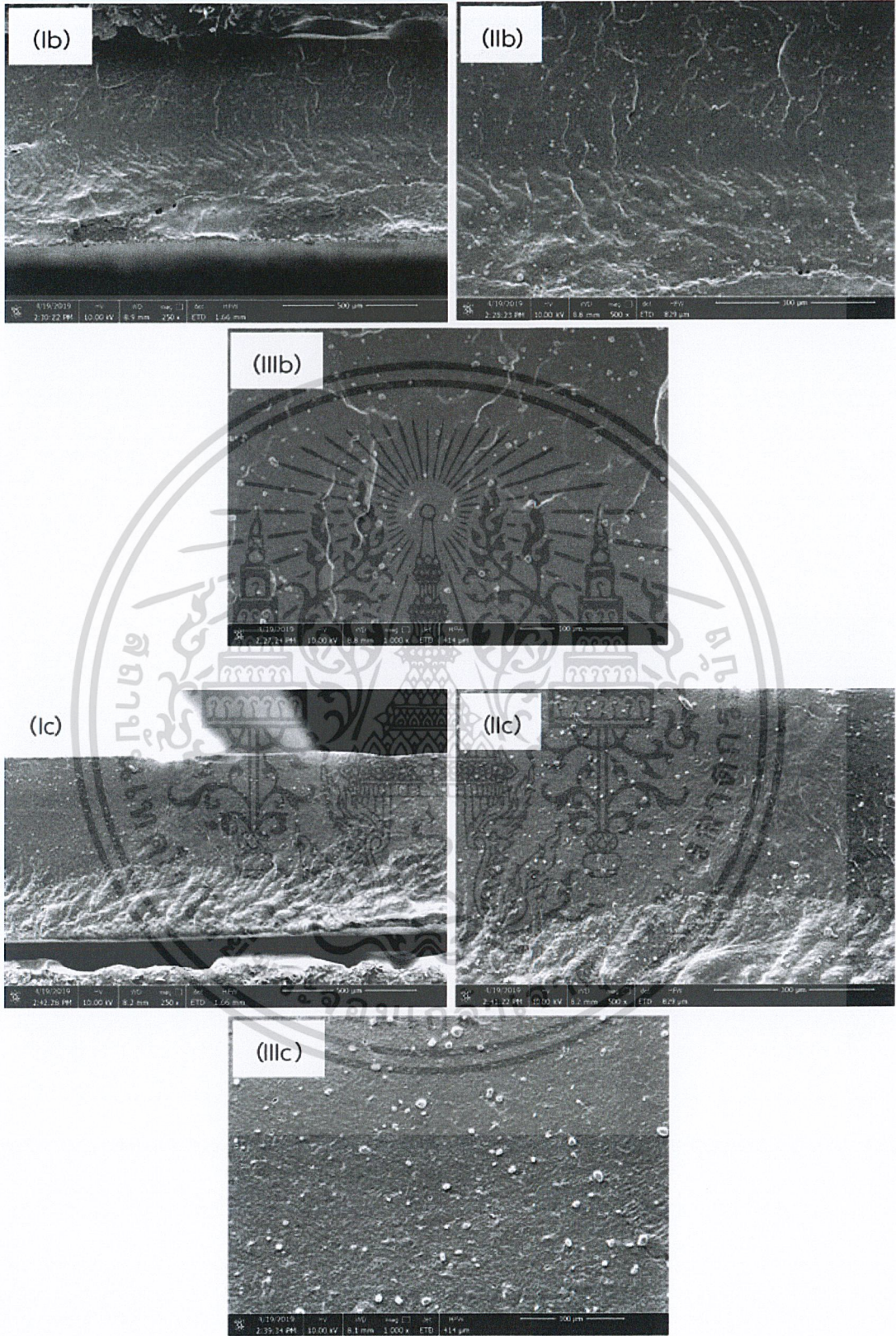
รูปที่ 4.16 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ของ NR/GO_1.58 wt% กำลังขยาย (a) 250X (b) 500X (c) 1000X

ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณภาพตัดขวาง (Cross section) เมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ในรูปที่ 4.16 ลงในแผ่นยางธรรมชาติ พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณภาพตัดขวาง มีลักษณะเรียบและพบแผ่นกราฟีนออกไซด์กระจายตัวอยู่ทั่วแผ่นยางธรรมชาติได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรอยพับย่นที่เกิดขึ้นในเนื้อยางธรรมชาติ

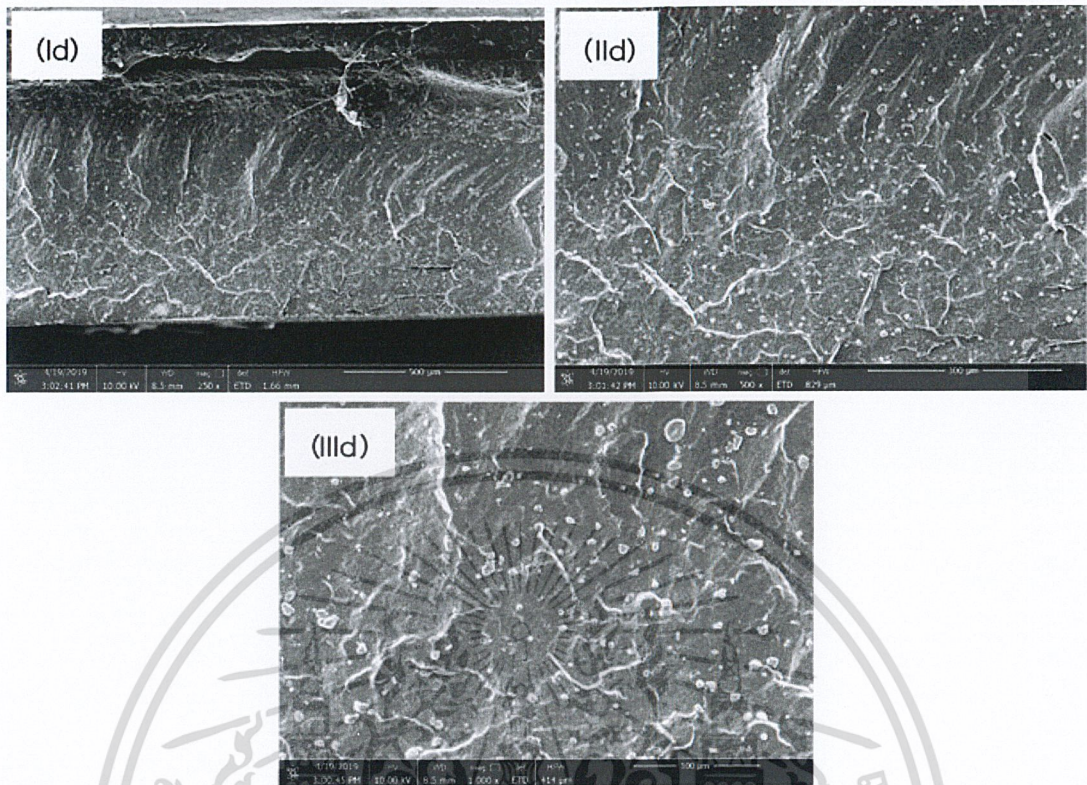
4.2.5.4 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ การนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า หรือการนำออกไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงภาพจากกล้อง SEM แสดงภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย (I) 250X (II) 500X (III) 1000X ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต โดย (a) NR/S/GO_0.34 wt% (b) NR/S/GO_0.68 wt% (c) NR/S/GO_1.13 wt% และ (d) NR/S/GO_1.58 wt%

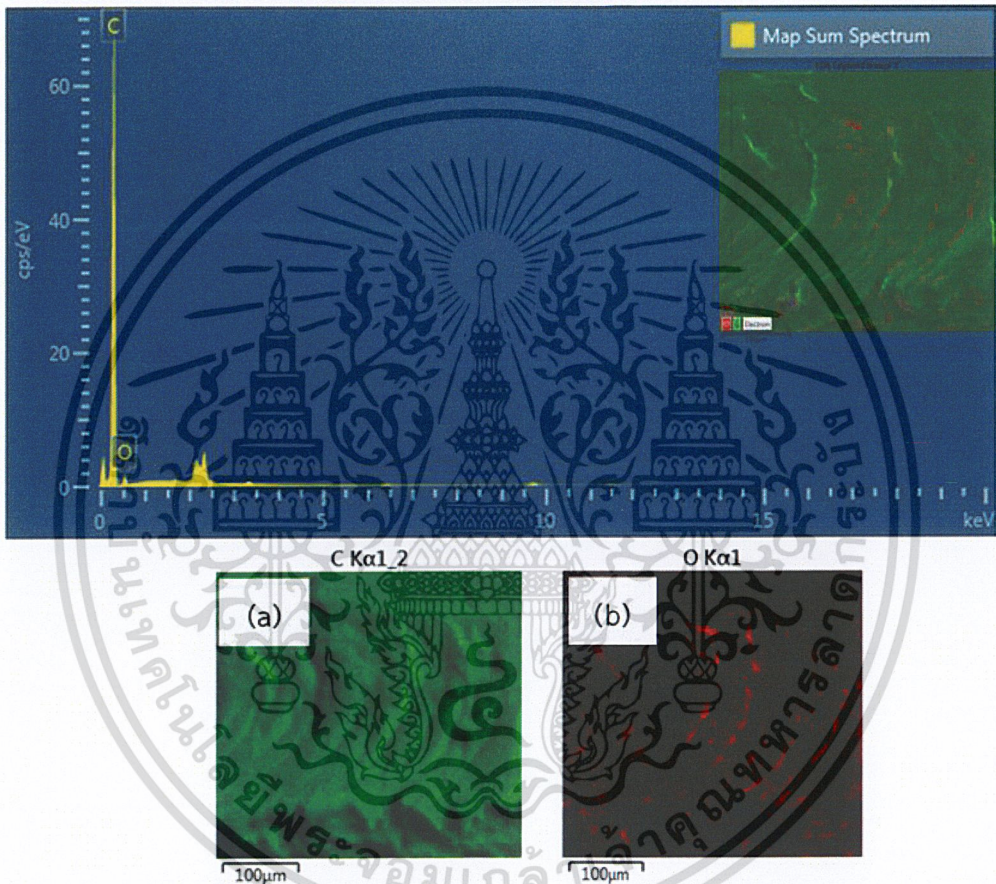
จากผลการศึกษาภาพตัดขวางแผ่นยางธรรมชาติที่เติมซัลเฟอร์ในปริมาณคงที่ (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) และเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ (ร้อยละ 0.34, 0.68, 1.13 และ 1.58 โดยน้ำหนัก) จากรูปที่ 4.17 (Ia) บริเวณด้านบนของแผ่นยางธรรมชาติมีอนุภาคของซัลเฟอร์สะสมอยู่มาก ซึ่งเกิดจากการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นทำให้น้ำยางธรรมชาติที่เตรียมได้มีความหนืดต่ำ ซัลเฟอร์จึงเกิดการตกตะกอนก่อนที่น้ำยางธรรมชาติจะแข็งตัว ส่งผลให้ซัลเฟอร์กระจายตัวในแผ่นยางธรรมชาติได้ไม่ดี และพบว่าเมื่อปริมาณกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ซัลเฟอร์กระจายตัวดีขึ้น ตามภาพ (Ia)-(IIIId) และภาพตัดขวางของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต พบกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อซัลเฟอร์กระจายตัวดีทำให้เกิดเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (Crosslink) ได้มากและปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้อายุการใช้งานคอมโพสิตมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ

เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบภายในเนื้อแผ่นยางธรรมชาติ โดยจะมุ่งเน้นไปที่ธาตุคาร์บอน (C) ซัลเฟอร์ (S) และออกซิเจน (O) โดยตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ คือ แผ่นยางธรรมชาติ, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต, แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตและแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต

4.2.6.1 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ

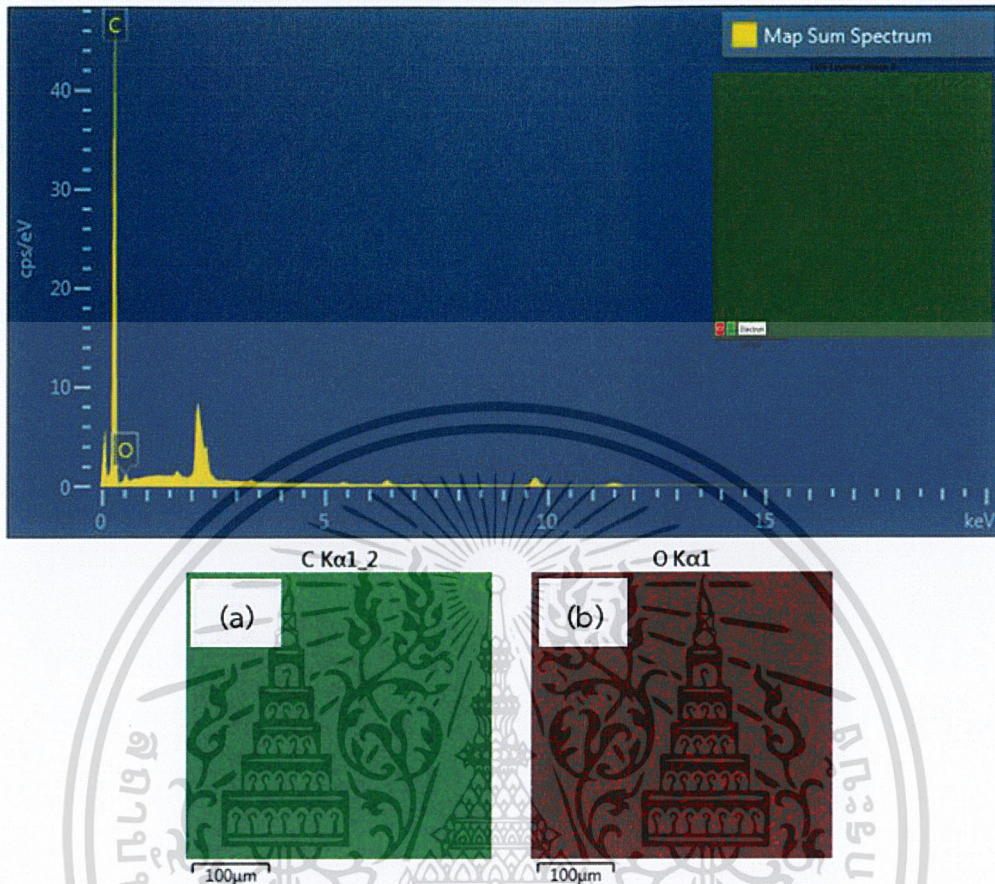


รูปที่ 4.18 แสดง EDS Spectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอนและ (b) ธาตุออกซิเจน

จากรูปที่ 4.18 แสดง EDS Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR) ตรวจวิเคราะห์พบธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ และธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งมาจากความชื้นและแก๊สต่าง ๆ ในอากาศเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) จากแผนที่ธาตุพบคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักดังรูป (a) และการกระจายตัวของออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอ ดังรูป (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6.2 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต

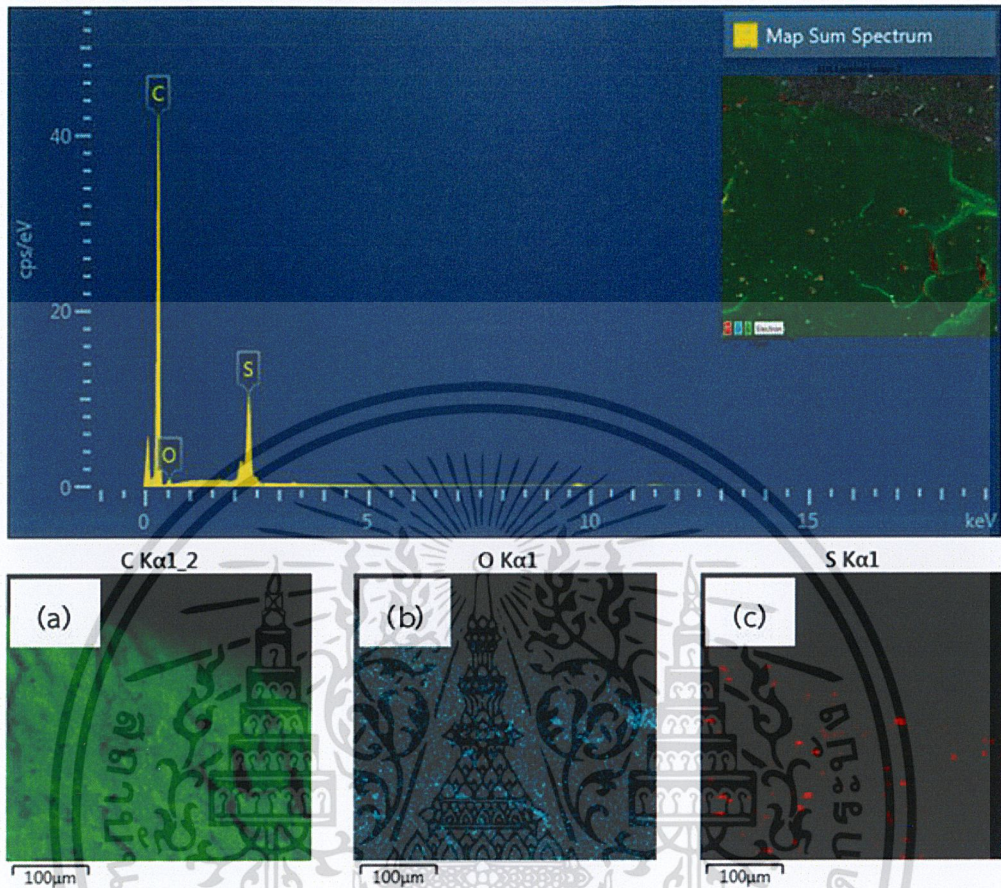


รูปที่ 4.19 แสดง EDS Spectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/GO_1.58 wt% และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอนและ (b) ธาตุออกซิเจน

จากรูปที่ 4.19 แสดง EDS Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR/GO_1.58 wt%) ตรวจวิเคราะห์พบธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ และธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งมาจากความชื้นและแก๊สต่าง ๆ ในอากาศเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) จากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของคาร์บอนดีขึ้นกว่ารูปที่ 4.18 ดังรูป (a) และการกระจายตัวของออกซิเจนดีขึ้นกว่ารูปที่ 4.18 ดังรูป (b) ซึ่งเกิดจากการเติมกราฟีนออกไซด์ไปในยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6.3 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์คอมโพสิต

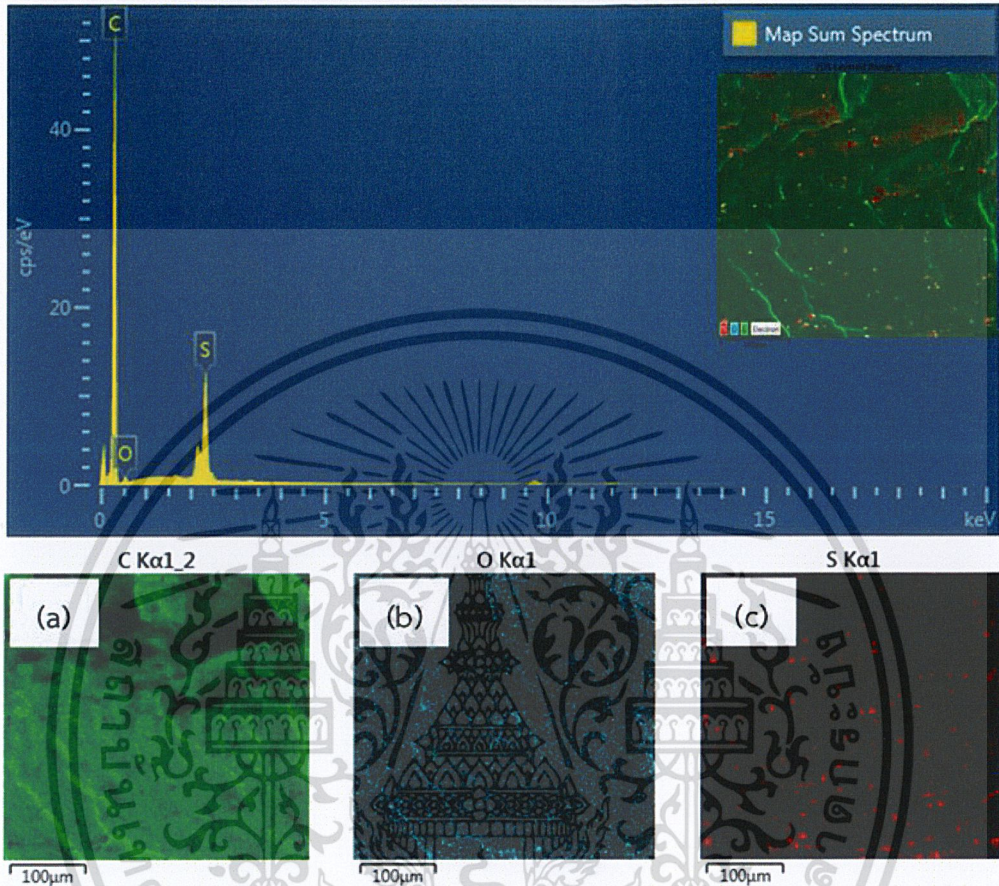


รูปที่ 4.20 แสดง EDS Spectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S และแผนที่ธาตุแสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจนและ (c) ธาตุซิลเฟอร์

จากรูปที่ 4.20 แสดง EDS Spectrum แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์คอมโพสิต (NR/S) ตรวจวิเคราะห์พบธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ ธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งมาจากความชื้นและแก๊สต่าง ๆ ในอากาศเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) และธาตุซิลเฟอร์ (S) ซึ่งมาจากการเติมสารแขวนลอยซิลเฟอร์ จากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักดังรูป (a) การกระจายตัวของออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอ ดังรูป (b) และการกระจายตัวของซิลเฟอร์เล็กน้อย ดังรูป (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6.4 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก คอมโพสิต

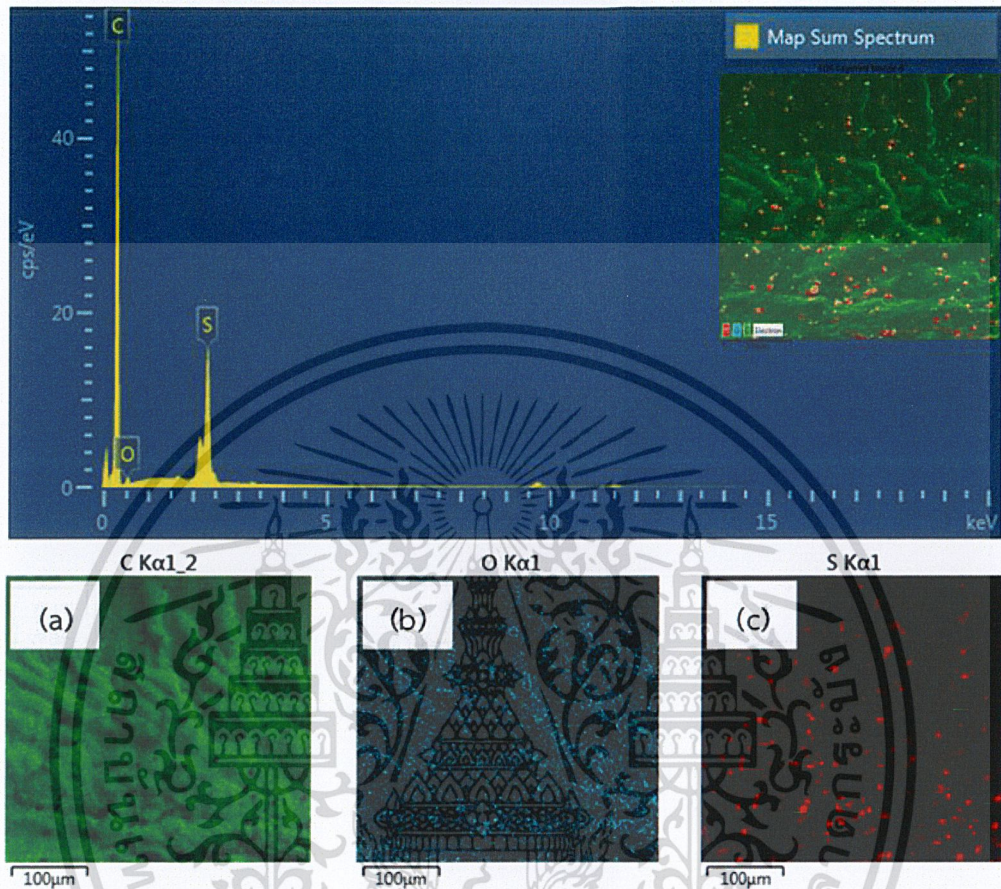


รูปที่ 4.21 แสดง EDS Spectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S/GO_0.34 wt% และแผนที่ธาตุ แสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจนและ (c) ธาตุซิลเฟอร์

จากรูปที่ 4.21 แสดง EDS Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ คอมโพสิต (NR/S/GO_0.34 wt%) ตรวจวิเคราะห์พบธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ ธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งมาจากความชื้นและแก๊สต่าง ๆ ในอากาศเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) เป็นต้น และธาตุซิลเฟอร์ (S) ซึ่งมาจากการเติมสารแขวนลอยซิลเฟอร์ จากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของคาร์บอนหนาแน่น จากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักดังรูป (a) การกระจายตัวของออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอ ดังรูป (b) และซิลเฟอร์มีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นกว่ารูปที่ 4.20 ดังรูป (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6.5 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก คอมโพลิต

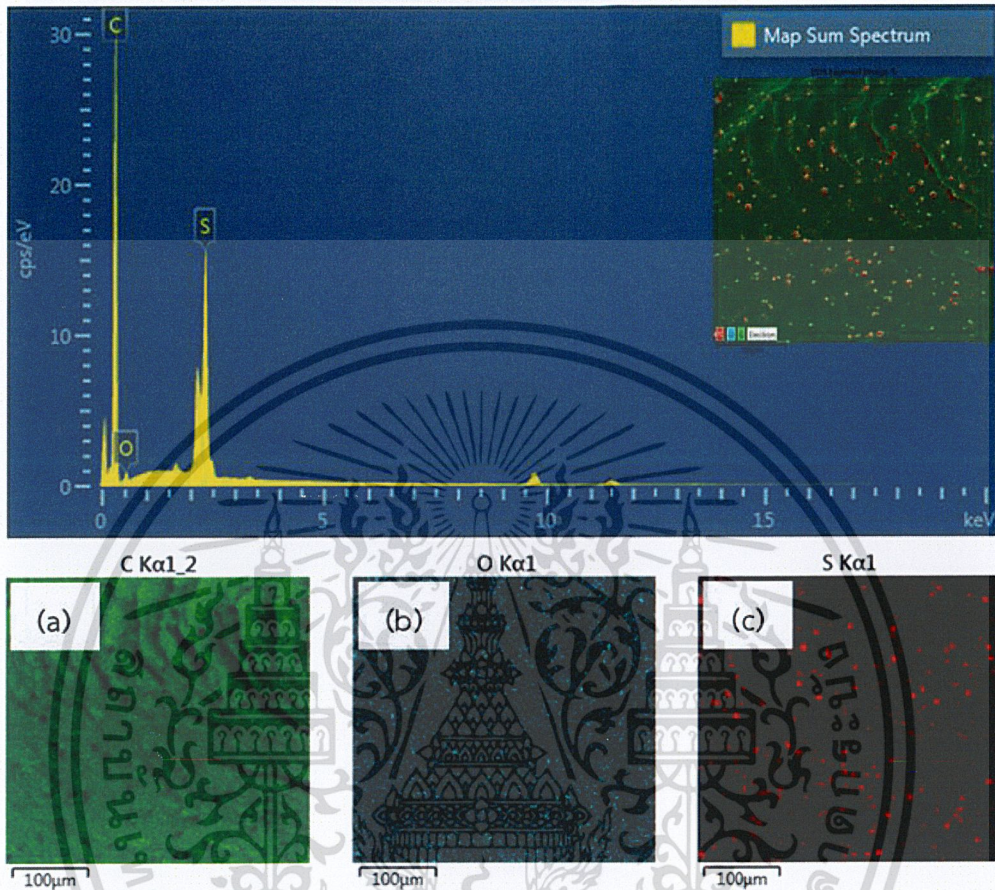


รูปที่ 4.22 แสดง EDS Spectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S/GO_0.68 wt% และแผนที่ธาตุ แสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจนและ (c) ธาตุซิลเฟอร์

จากรูปที่ 4.22 แสดง EDS Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ คอมโพลิต (NR/S/GO_0.68 wt%) ตรวจวิเคราะห์พบธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ ธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งมาจากความชื้นและแก๊สต่าง ๆ ในอากาศเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) เป็นต้น และธาตุซิลเฟอร์ (S) ซึ่งมาจากการเติมสารแขวนลอยซิลเฟอร์จากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ดังรูป (a) การกระจายตัวของออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอ ดังรูป (b) และซิลเฟอร์มีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นกว่ารูปที่ 4.21 ดังรูป (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6.6 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนัก คอมโพลีต

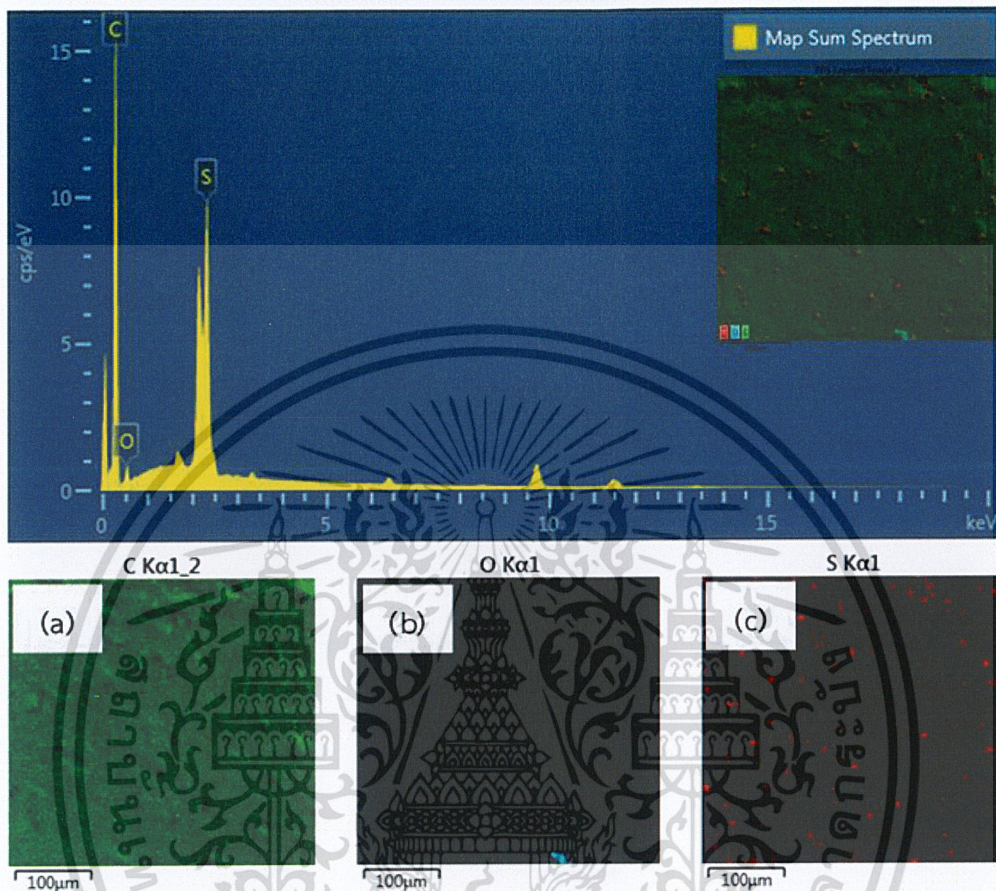


รูปที่ 4.23 แสดง EDS Spectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S/GO_1.13 wt% และแผนที่ธาตุ แสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจนและ (c) ธาตุซัลเฟอร์

จากรูปที่ 4.23 แสดง EDS Spectrum แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพลีต (NR/S/GO_0.68 wt%) ตรวจวิเคราะห์พบธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ ธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งมาจากความชื้นและแก๊สต่าง ๆ ในอากาศเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) เป็นต้นและธาตุซัลเฟอร์ (S) ซึ่งมาจากการเติมสารแขวนลอยซัลเฟอร์ จากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักดังรูป (a) การกระจายตัวของออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอดังรูป (b) และซัลเฟอร์มีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นกว่ารูปที่ 4.22 ดังรูป (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6.7 องค์ประกอบของธาตุของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก คอมโพสิต



รูปที่ 4.24 แสดง EDS Spectrum องค์ประกอบของธาตุใน NR/S/GO_1.58 wt% และแผนที่ธาตุ แสดงการกระจายตัวของ (a) ธาตุคาร์บอน (b) ธาตุออกซิเจนและ (c) ธาตุซัลเฟอร์

จากรูปที่ 4.24 แสดง EDS Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ คอมโพสิต (NR/S/GO_0.68 wt%) ตรวจวิเคราะห์พบธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ ธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งมาจากความชื้นและแก๊สต่าง ๆ ในอากาศเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สออกซิเจน (O_2) และธาตุซัลเฟอร์ (S) ซึ่งมาจากการเติมสารแขวนลอยซัลเฟอร์ จากแผนที่ธาตุพบการกระจายตัวของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักดังรูป (a) การกระจายตัวของออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอ ดังรูป (b) และซัลเฟอร์มีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นกว่ารูปที่ 4.23 ดังรูป (c)

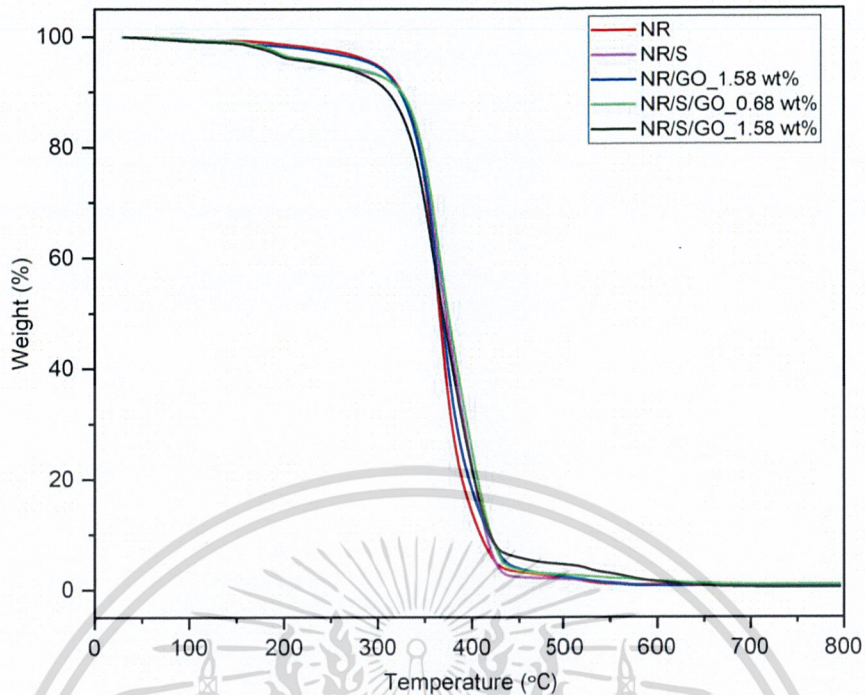
จากรูปที่ 4.21 ถึง 4.24 แสดง EDS Spectrum ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีน-ออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ คอมโพสิต ตรวจวิเคราะห์พบธาตุคาร์บอน, ธาตุออกซิเจน และธาตุซัลเฟอร์ไม่ต่างกันแต่พบการกระจายตัวของซัลเฟอร์ที่ดีขึ้นตามลำดับ

4.2.7 ผลการวิเคราะห์เทคนิคเชิงความร้อน (TGA)

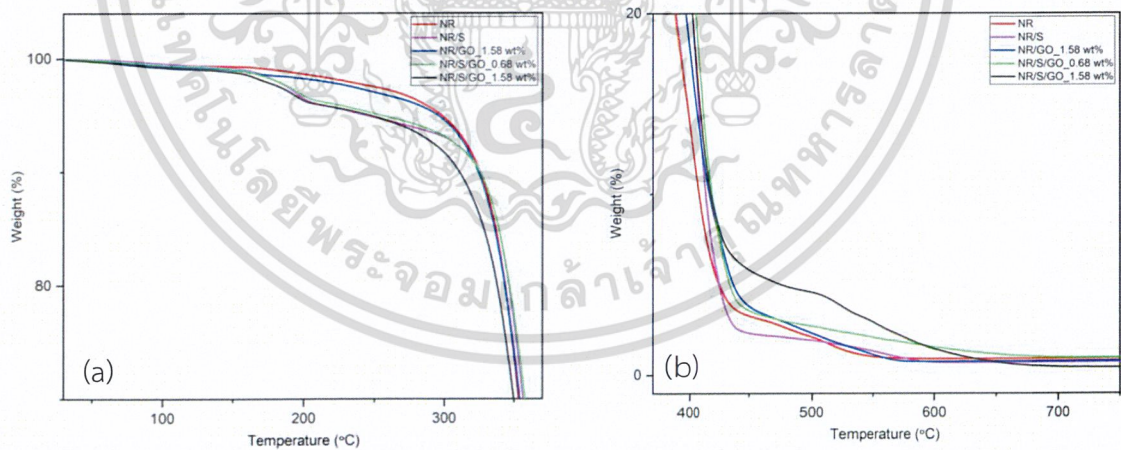
การศึกษาสมบัติเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis : TGA) เป็นการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อย คือ แก๊สไนโตรเจนและอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 50 °C ถึง 800 °C โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลายหรือการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ โดยได้ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนทั้งหมด 5 ประเภท ดังต่อไปนี้

- แผ่นยางธรรมชาติ (NR)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต (NR/S)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_0.68 wt%)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_1.58 wt%)
- แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/GO_1.58 wt%)

ซึ่งผลการวิเคราะห์แผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต แสดงดังรูป 4.25



รูปที่ 4.25 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของสารตัวอย่าง จากผลการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียของร้อยละโดยน้ำหนักของ NR, NR/S, NR/GO_1.58 wt%, NR/S/GO_0.68 wt% และ NR/S/GO_1.58 wt%



รูปที่ 4.26 (a) แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของสารตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิของการเริ่มต้นสลายตัวและ (b) แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA ของสารตัวอย่าง ในช่วงอุณหภูมิของการสิ้นสุดสลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตชนิดต่าง ๆ

ประเภทของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต	อุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต (°C)
NR	365.60
NR/S	364.09
NR/S/GO_0.68 wt%	367.53
NR/S/GO_1.58 wt%	365.27
NR/GO_1.58 wt%	367.86

จากรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.2 พบว่าแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตมีการตอบสนองเชิงความร้อนที่ใกล้เคียงกันกับแผ่นยางธรรมชาติ โดยแผ่นยางธรรมชาติ (NR) มีอุณหภูมิเฉลี่ยในการสลายตัวอยู่ที่ 365.60 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงเอกลักษณ์เฉพาะในการสลายตัวของโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ [60] ในขณะที่เมื่อทำการเติมซิลเฟอร์ลงไปส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยในการสลายตัวอยู่ที่ 364.09 องศาเซลเซียสและที่แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตร้อยละ 0.68 และ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_0.68 wt%, NR/S/GO_1.58 wt%) มีอุณหภูมิเฉลี่ยในการสลายตัวสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ คือ 367.53 และ 365.27 องศาเซลเซียส และยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/GO_1.58 wt%) พบว่ามีอุณหภูมิเฉลี่ยการสลายตัวของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตเป็น 367.86 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าในแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่มีองค์ประกอบของกราฟีนออกไซด์จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยในการสลายตัวที่สูงกว่ายางธรรมชาติเพียงเล็กน้อย ซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุคอมโพสิตเนื่องจากการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปปริมาณน้อยและในขณะที่การเติมซิลเฟอร์นั้นไม่ได้ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 4.26 (a) แสดงเทอร์โมแกรมของสารตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิของการเริ่มต้นสลายตัวพบว่าแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต ซึ่งไม่มีองค์ประกอบของซิลเฟอร์มีการสลายตัวที่เป็นแบบ Single step ที่ชัดเจนในขณะที่แผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่มีองค์ประกอบของซิลเฟอร์จะพบช่วงการสลายตัวของซิลเฟอร์ที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียสซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนเฟสของซิลเฟอร์และเมื่อสิ้นสุดการสลายตัวของซิลเฟอร์พบว่าแนวโน้มของการสลายตัวกลับมาเป็นแบบเดียวกับยางธรรมชาติและจากรูปที่ 4.26 (b) แสดงเทอร์โมแกรมของสารตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิของการสิ้นสุดสลายตัวพบว่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในเชิง

ความร้อนและเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก กับยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก พบว่าแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักมีองค์ประกอบของสารเหลืออยู่มากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณของกราฟีนออกไซด์ซึ่งมีคาร์บอนมากจึงมีเถ้าเหลืออยู่มาก ในขณะที่แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักมีองค์ประกอบของซิลเฟอร์อยู่ซึ่งซิลเฟอร์กลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิ 445 องศาเซลเซียสจึงเป็นผลให้น้ำหนักของเถ้าที่คงเหลือมีน้อยกว่า [61]

4.2.8 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

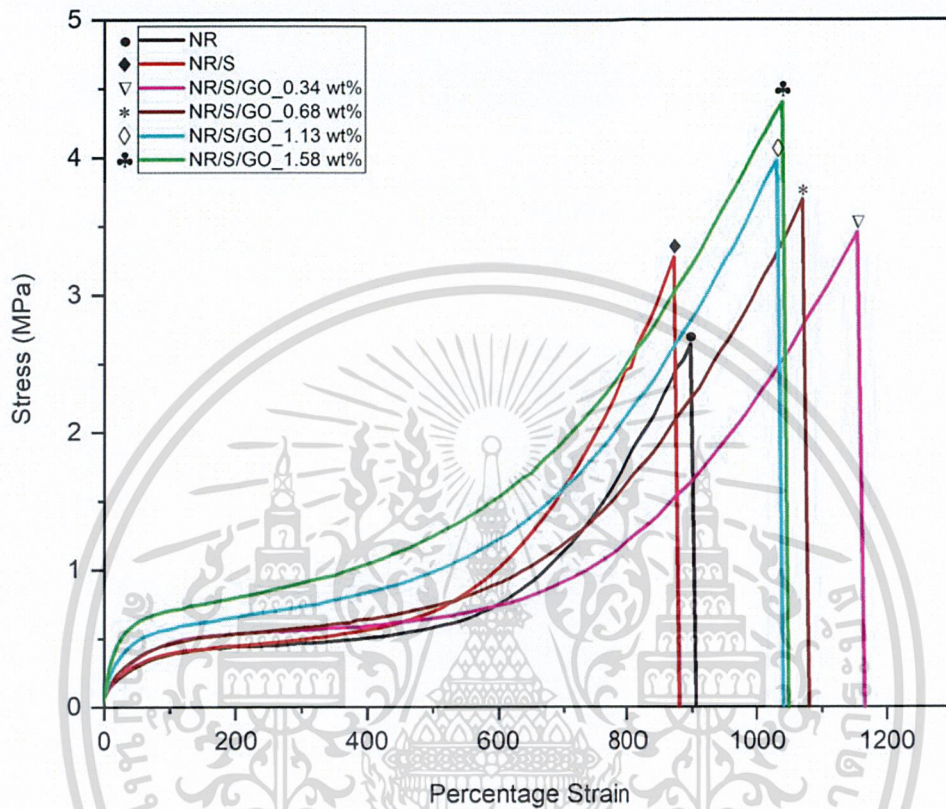
การศึกษาสมบัติเชิงกล (Tensile testing) โดยการทดสอบความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตทั้ง 11 ประเภท ดังต่อไปนี้

- แผ่นยางธรรมชาติ (NR)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์คอมโพสิต (NR/S)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_0.34 wt%)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_0.68 wt%)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_1.13 wt%)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_1.58 wt%)
- แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/GO_1.58 wt%)
- แผ่นยางธรรมชาติที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (NR 100 °C 4 Hr.)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (NR/S 100 °C 4 Hr.)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (NR/S/GO_1.58 wt% 100 °C 4 Hr.)
- แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (NR/GO_1.58 wt% 100 °C 4 Hr.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือว่าท่านมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและตัดวางผังสิ่งพิมพ์ของเอกสารตลอดชีพการนำไปใช้

ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

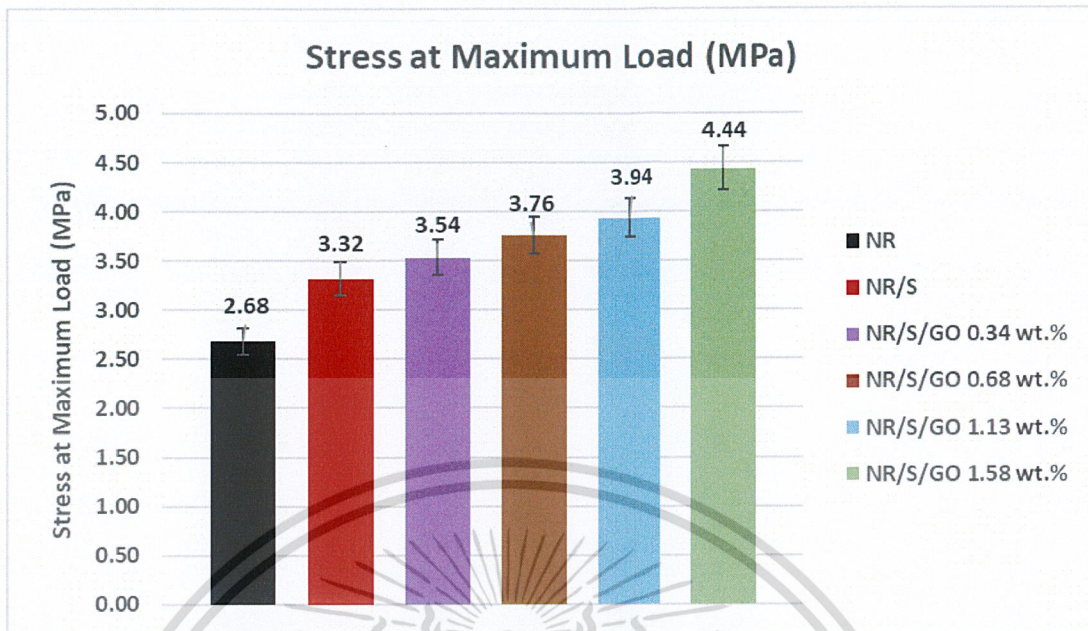
จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบ สามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบในตัวอย่างแต่ละประเภทที่มีอัตราส่วนของกราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกันได้ดังต่อไปนี้



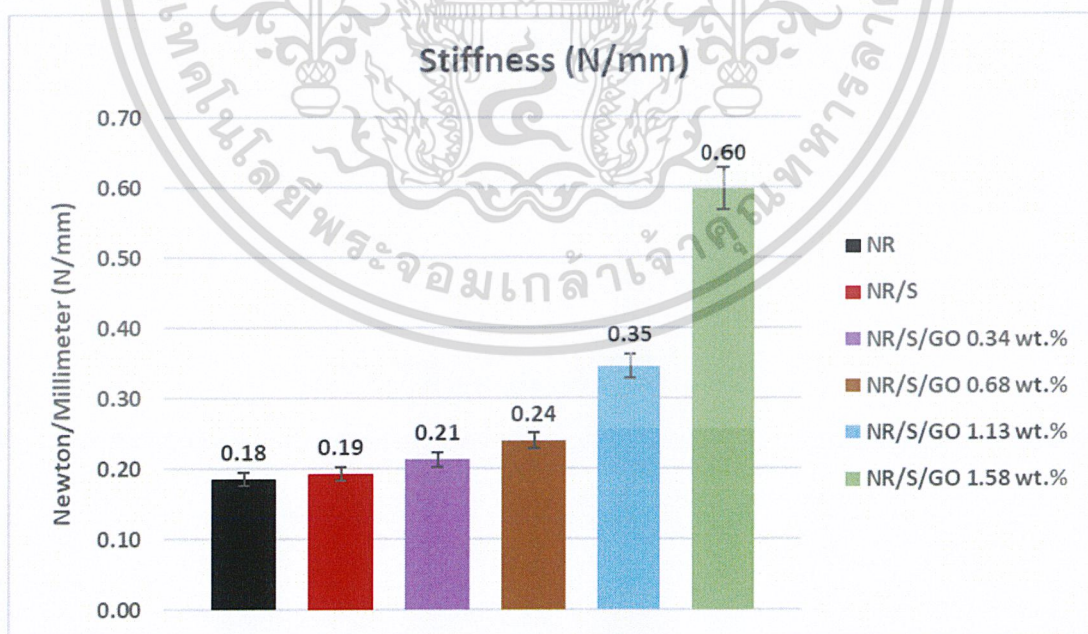
รูปที่ 4.27 แสดงกราฟ Tensile Strength ของ NR, NR/S, NR/S/GO_0.34 wt%, NR/S/GO_0.68 wt%, NR/S/GO_1.13 wt% และ NR/S/GO_1.58 wt%

จากรูปที่ 4.27 พบว่ายางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์จะมีค่าความเค้น (Stress) สูงกว่าในขณะที่ค่าความเครียด (Strain) ต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากเมื่อเติมซิลเฟอร์ซึ่งเป็นสารวัลคาไนซ์ลงไปซึ่งจะทำให้ยางเกิดการคงรูป (Crosslink) เป็นผลให้ต้องใช้แรงเพิ่มมากขึ้นในการทำลายแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต นอกจากนี้ยังทำให้อัตราการเกิดผลึกเมื่อถูกยืดสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่า strain ลดลงเล็กน้อย [36] ในขณะที่เมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ลงในแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์พบว่าเมื่อปริมาณของกราฟีนออกไซด์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่า stress สูงขึ้น เนื่องจากกราฟีนออกไซด์เป็นสารเสริมแรงซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับแผ่นของแข็งขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุอ่อนนุ่ม อีกทั้งการเติมกราฟีนออกไซด์นั้นยังช่วยให้ซิลเฟอร์มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ไม่เกิดการแยกชั้นจึงส่งผลให้ค่า Stress สูงขึ้น ในขณะที่ค่า Strain ลดลงเมื่อเทียบกับการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่ต่ำ

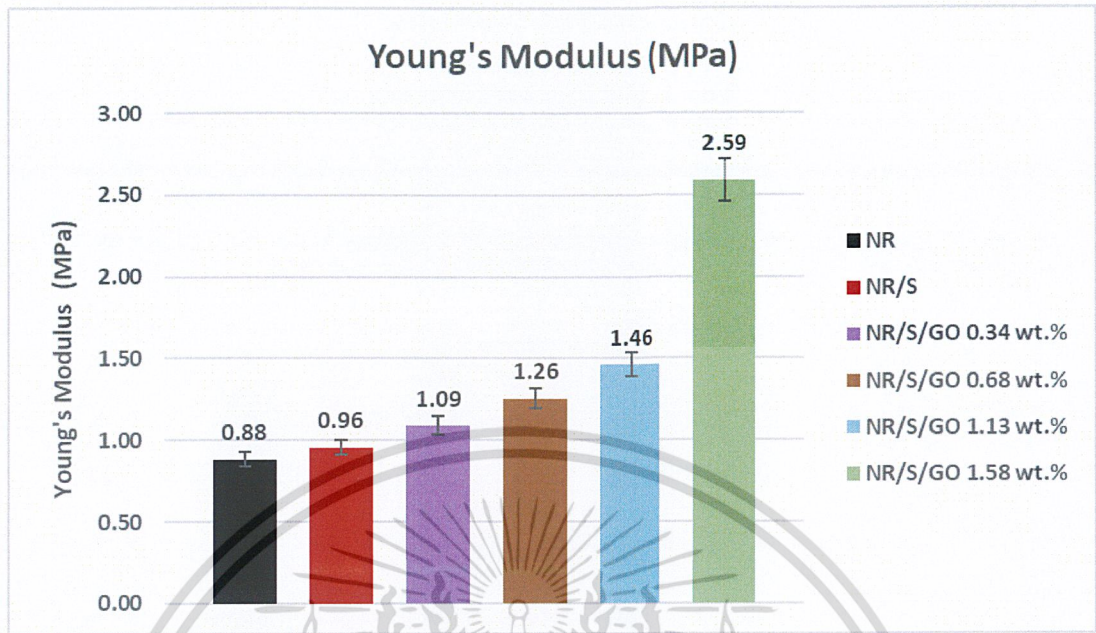
เอกสารที่ว่าเนื่องจากเมื่อปริมาณกราฟีนออกไซด์มากเกินไปจะทำให้วัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้มีความแข็งแรง ไม่ว่าสูงขึ้นแต่เปราะ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



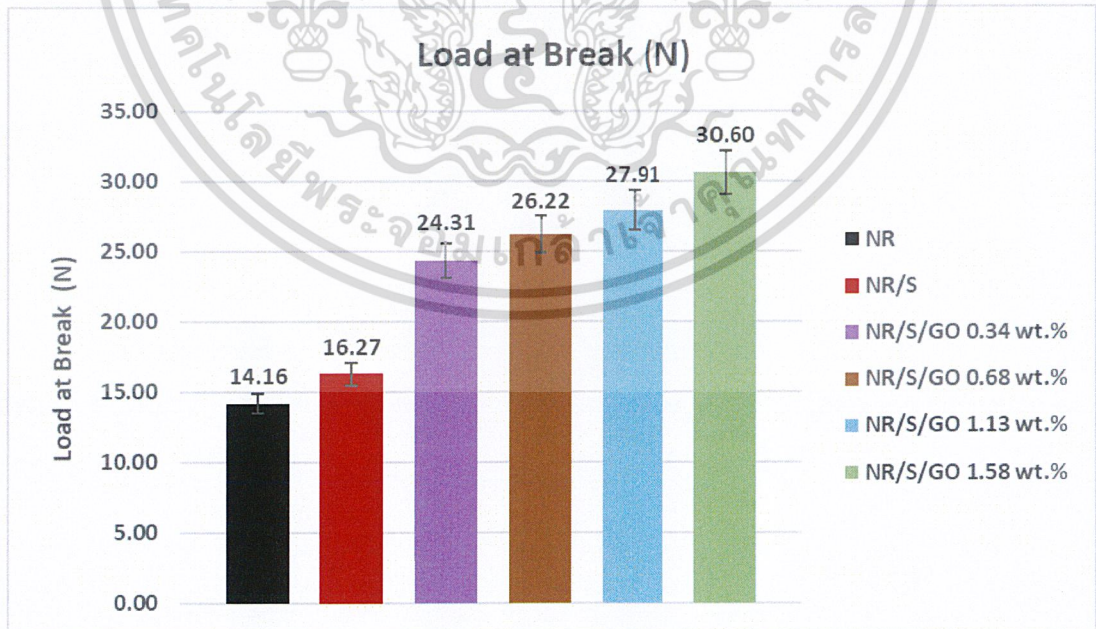
รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum Load ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตผสมประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ประเภทต่าง ๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบ Load at break ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ

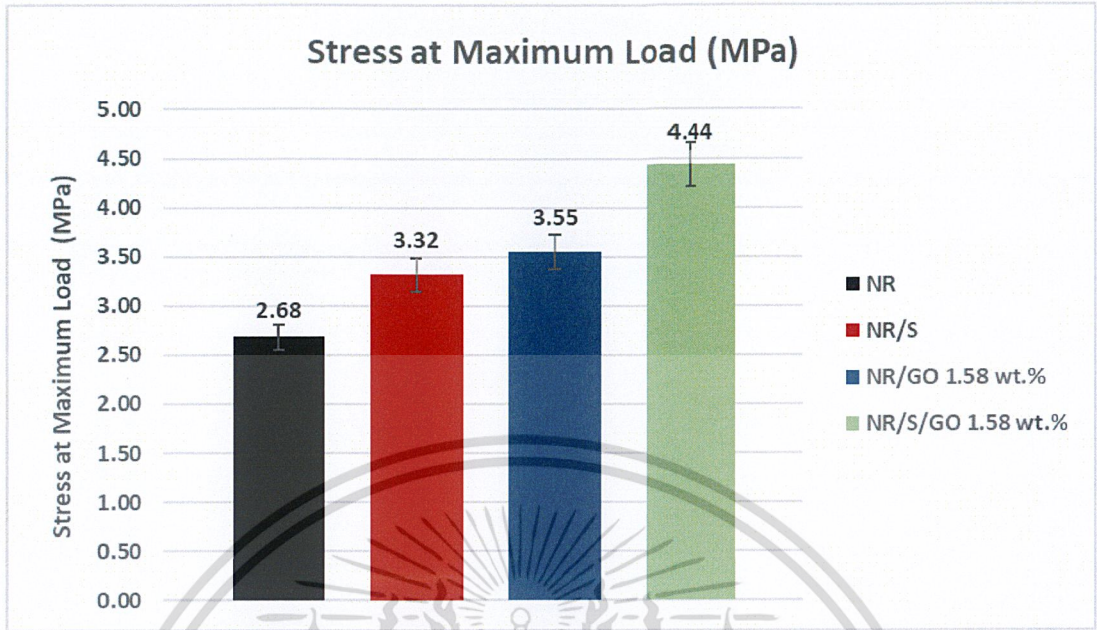
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ

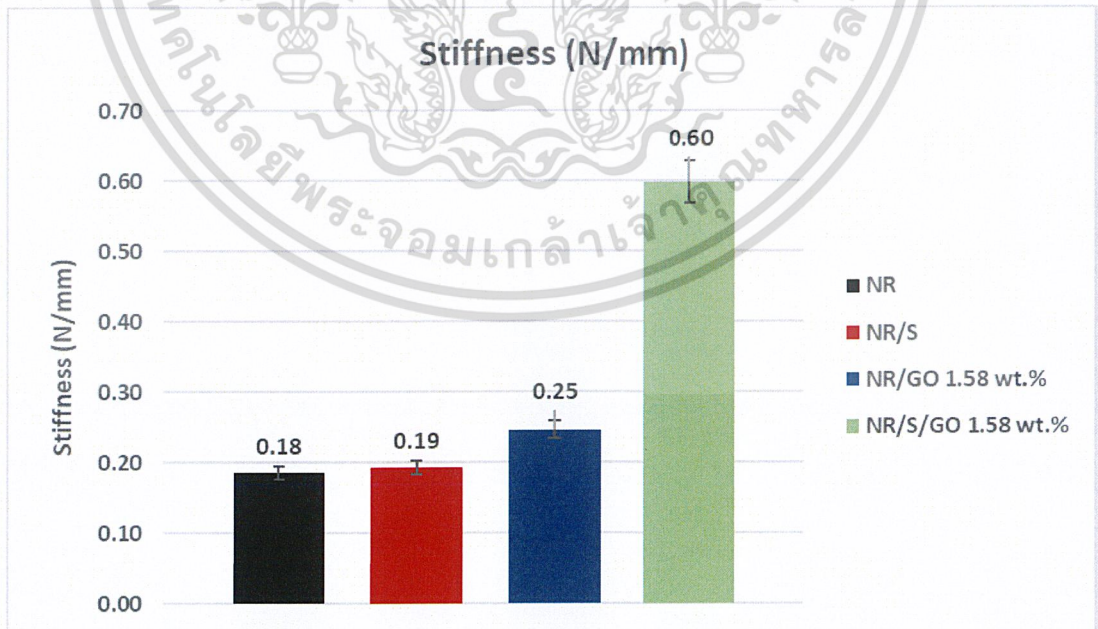
ประเภทของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต	Stress at Maximum Load (MPa)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)	Load at Break (N)
NR	2.68	0.18	0.88	14.16
NR/S	3.32	0.19	0.96	16.27
NR/S/GO_0.34 wt%	3.54	0.21	1.09	24.31
NR/S/GO_0.68 wt%	3.76	0.24	1.26	26.22
NR/S/GO_1.13 wt%	3.94	0.35	1.46	27.91
NR/S/GO_1.58 wt%	4.40	0.60	2.59	30.60

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.28-4.31 พบว่าเมื่อเติมซัลเฟอร์ลงในแผ่นยางธรรมชาติ (ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) พบว่าแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์ (NR/S) นั้นมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load), ค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness), ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ (NR) เนื่องจากซัลเฟอร์ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการการวัลคาไนซ์ของยางช่วยให้ยางเกิดการคงรูปโดยอนุภาคซัลเฟอร์ที่มีขนาดเล็กมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของแผ่นยางที่ผสมซัลเฟอร์ดีขึ้น ในขณะที่เมื่อมีการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.34, 0.68, 1.13 และ 1.58 โดยน้ำหนักลงในแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load), ค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness), ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break) เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซัลเฟอร์มีการกระจายตัวที่ดีเนื่องจากสารผสมที่เตรียมได้มีความหนืดมากจึงทำให้อนุภาคของซัลเฟอร์ขยับตัวได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณกราฟีนที่เติมไปในปริมาณน้อยกว่าซึ่งมีการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจึงทำให้สารผสมที่เตรียมได้มีความหนืดน้อยเป็นผลให้ซัลเฟอร์เกิดการเคลื่อนที่ไปตกอยู่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำ และประเภทของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดคือ ยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก

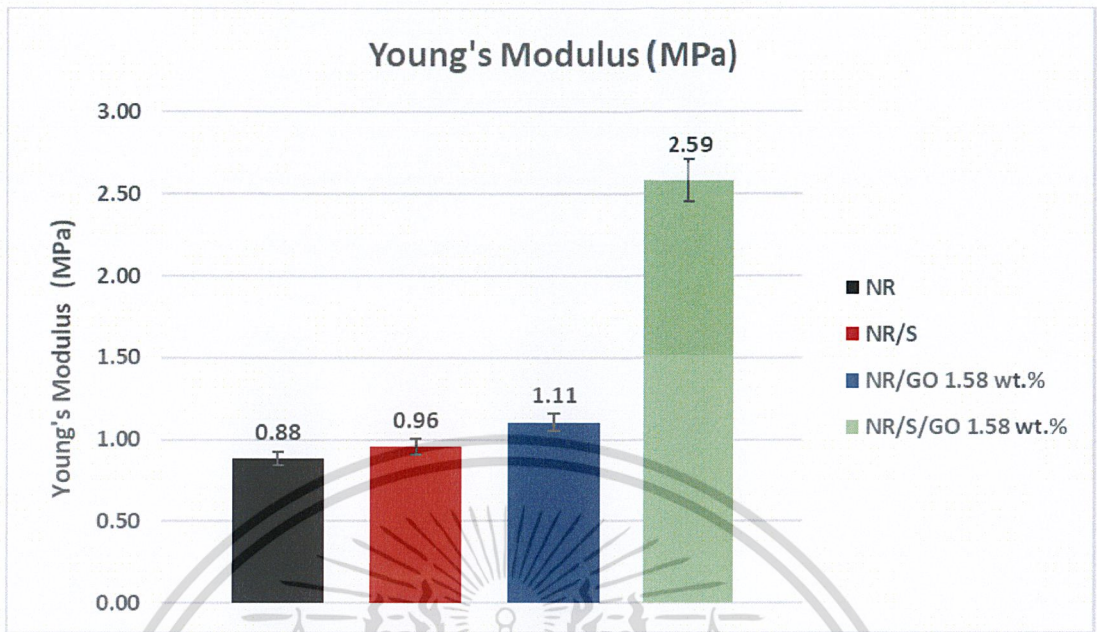
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



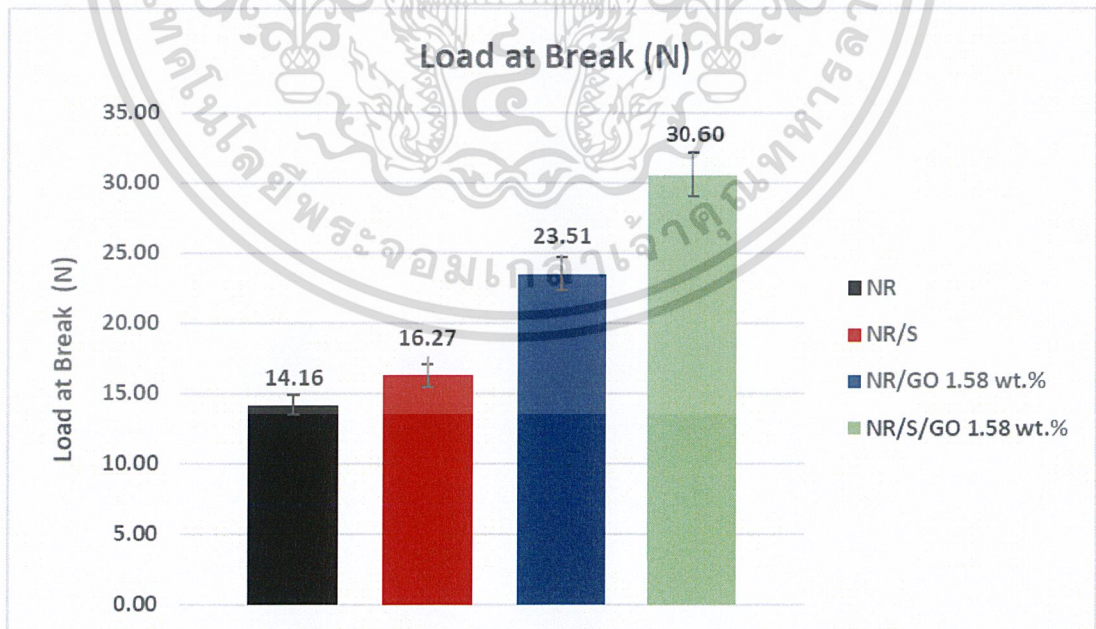
รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum Load ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ประเภทต่าง ๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบ Load at break ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ

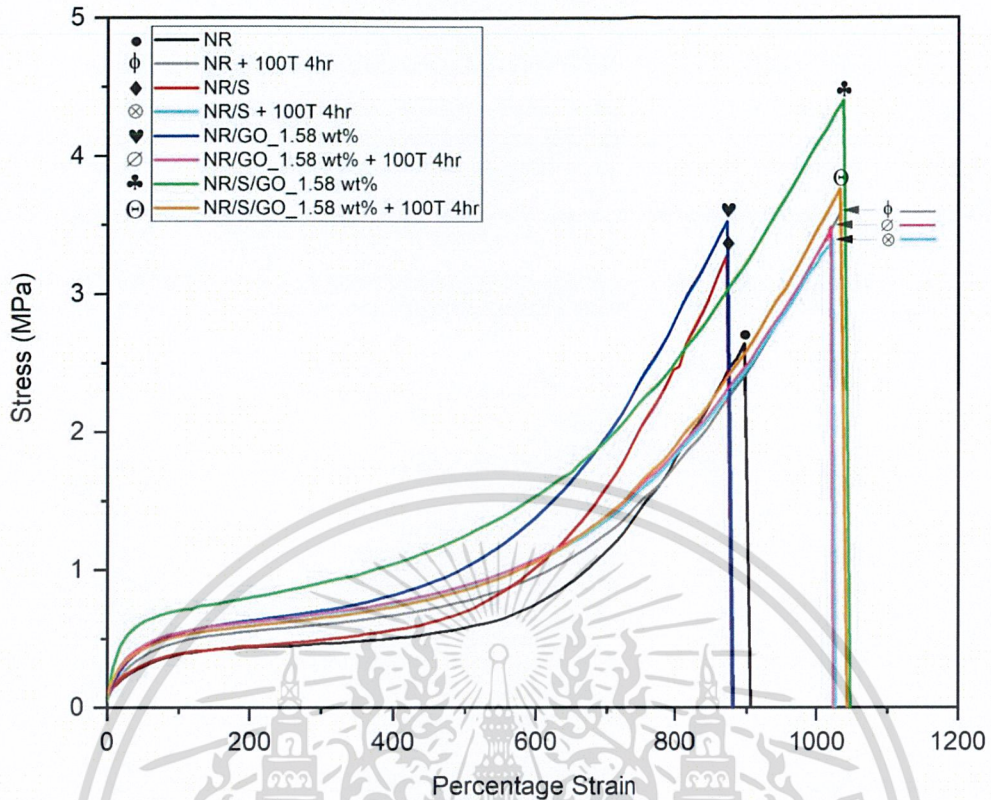
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ

ประเภทของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต	Stress at Maximum Load (MPa)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)	Load at Break (N)
NR	2.68	0.18	0.88	14.16
NR/S	3.32	0.19	0.96	16.27
NR/GO_1.58 wt%	3.55	0.25	1.11	23.51
NR/S/GO_1.58 wt%	4.40	0.60	2.59	30.60

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.33 – 4.36 พบว่าเมื่อเติมซิลเฟอร์ลงในแผ่นยางธรรมชาติ (ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) พบว่าแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์ (NR/S) นั้นมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load), ค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness), ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ (NR) เนื่องจากซิลเฟอร์ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการการวัลคาไนซ์ของยางช่วยให้เกิดการคงรูปโดยอนุภาคซิลเฟอร์ที่มีขนาดเล็กมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของแผ่นยางที่ผสมซิลเฟอร์ดีขึ้น ในขณะที่เมื่อมีการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักลงในแผ่นยางธรรมชาติพบว่าแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ (NR/GO) นั้นมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load), ค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness), ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นยางธรรมชาติ (NR) และยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์ (NR/S) และในยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

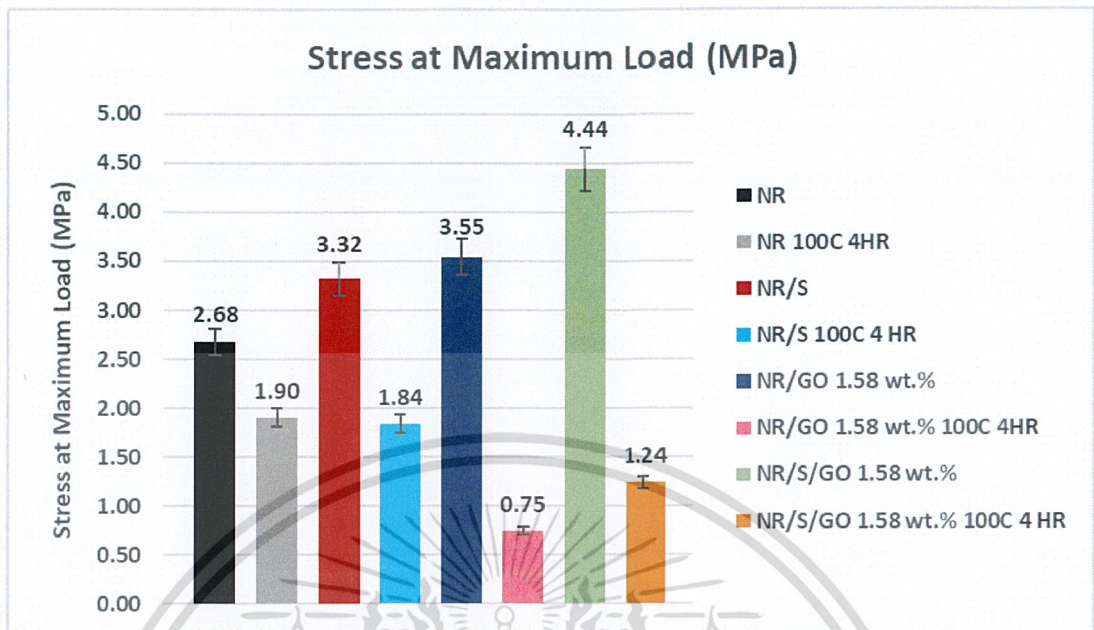
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



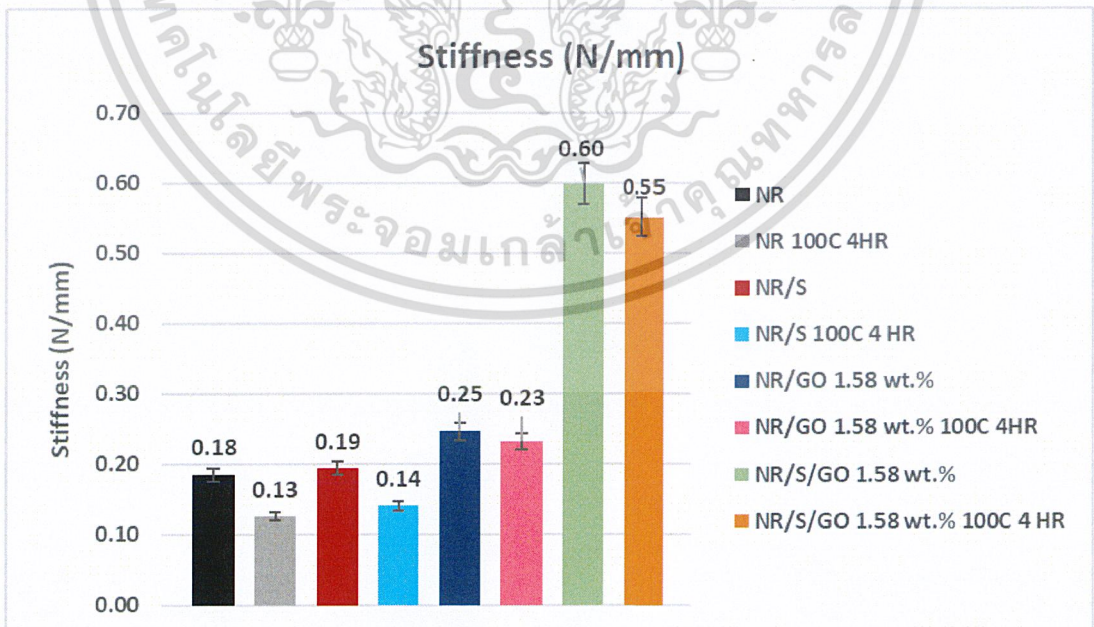
รูปที่ 4.37 แสดงกราฟ Tensile Strength ของ NR, NR/S, NR/S/GO_1.58 wt%, NR/GO_1.58 wt%, NR 100 °C 4 Hr., NR/S 100 °C 4 Hr., NR/S/GO_1.58 wt% 100 °C 4 Hr. และ NR/GO_1.58 wt% 100 °C 4 Hr.

จากรูปที่ 4.37 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ และแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนมีความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการอบอ่อนนี้ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์ได้รับพลังงานและเกิดการสั่นได้มากขึ้น ทำให้สายโซ่เรียงตัวอยู่อย่างหลวม ๆ และมีช่องว่างเพิ่มขึ้นส่งผลให้สายโซ่มีอิสระในการหมุนมากขึ้นทำให้พอลิเมอร์มีความเหนียวและความยืดหยุ่นมากกว่าแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการการอบอ่อน ในขณะที่แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบอ่อนให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน ซึ่งเป็นผลจากอนุภาคซัลเฟอร์มีการกระจายตัวที่ดีกว่าจึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเนื่องจากกระบวนการการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสทำให้ซัลเฟอร์เริ่มเกิดการหลอมและรวมตัวกันส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำลง โดยจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าประเภทของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดคือแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

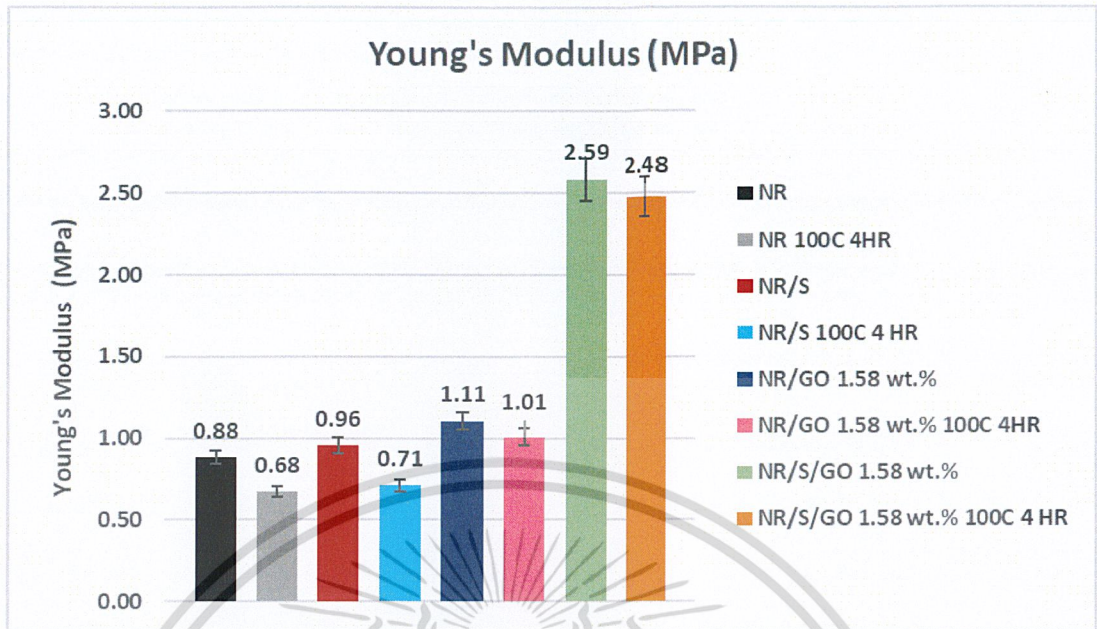


รูปที่ 4.38 แสดงการเปรียบเทียบ Stress at Maximum Load ของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ

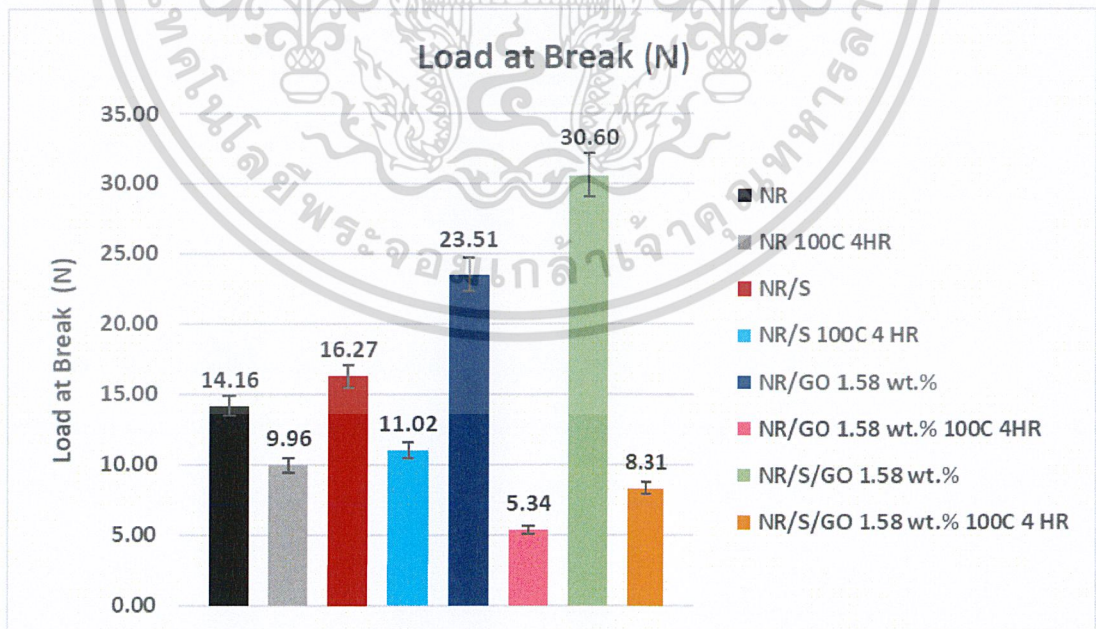


รูปที่ 4.39 แสดงการเปรียบเทียบ Stiffness ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 แสดงการเปรียบเทียบ Young's Modulus ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 4.41 แสดงการเปรียบเทียบ Load at break ของแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ประเภทของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต	Stress at Maximum Load (MPa)	Stiffness (N/mm)	Young's Modulus (MPa)	Load at Break (N)
NR	1.90	0.13	0.68	9.96
NR/S	1.84	0.14	0.71	11.02
NR/GO_1.58 wt%	0.75	1.00	1.01	5.34
NR/S/GO_1.58 wt%	1.24	0.69	2.48	8.31

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.38 – 4.41 พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load), ค่าแรงดึง ณ จุดขาด (Load at break), ค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อนมีค่าสูงกว่า เนื่องจากยางธรรมชาติที่เราใช้เป็นชนิดแอมโมเนียสูงเมื่อผ่านกระบวนการอบอ่อนจึงพบว่ามีแอมโมเนียบางส่วนที่ยังคงค้างอยู่ในแผ่นยางคอมโพสิตเกิดเป็นแก๊สเป็นผลให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานได้ อีกทั้งเมื่อผ่านกระบวนการการอบอ่อนจะพบการแยกตัวของซัลเฟอร์เป็นดอกบริเวณพื้นผิวของแผ่นยางซึ่งเกิดจากการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสทำให้ซัลเฟอร์เกิดการหลอมเกาะกลุ่มกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและการกระจายตัวของซัลเฟอร์ลดลงเป็นผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการอบอ่อนมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่า

4.2.9 ผลการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทำการทดสอบโดยวิธี Agar disc diffusion โดยเชื้อที่ใช้ทดสอบมี 2 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 (*S. aureus*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก และ *Escherichia coli* ATCC 25922 (*E. coli*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ โดยใช้แบคทีเรียจำนวน 1×10^8 cfu/g (Colony forming unit) ซึ่งวัดผลโดยการวัดรัศมีของโซนยับยั้ง (Inhibition Zone) ในหน่วยมิลลิเมตร (mm) โดยแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีทั้งหมด 6 ประเภท ดังต่อไปนี้

- แผ่นยางธรรมชาติ (NR)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต (NR/S)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_0.34 wt%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_1.13 wt%)
- แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_1.58 wt%)
- แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/GO_1.58 wt%)

4.2.9.1 ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก

จากการศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติผสมด้วยวิธี Agar disc diffusion โดยใช้เชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) โดยแสดงรัศมีของโซนยับยั้ง (Inhibition Zone) ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต 6 ประเภท ได้แก่ A) NR Pure, B) NR/S, C) NR/S/GO_0.34 wt%, D) NR/S/GO_1.13 wt%, E) NR/S/GO_1.58 wt% และ F) NR/GO_1.58 wt%

จากรูปที่ 4.42 แสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) โดยจากการทดสอบพบว่าแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม (NR Pure) และแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/GO_1.58 wt%) ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้เนื่องจากไม่พบรัศมีของโซนยับยั้ง ในขณะที่แผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่มีส่วนผสมของเอกสารซัลเฟอร์ ได้แก่ แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์ (NR/S), แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ค่าไม่ว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_0.34 wt%), แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/

กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_1.13 wt%) และ แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก (NR/S/GO_1.58 wt%) สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้เนื่องจากมีรัศมีของโซนนยับยั้งเกิดขึ้น โดยสาเหตุของการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเกิดจากซัลเฟอร์สามารถเกิดการแพร่เข้าไปยังเซลล์แบคทีเรียได้เนื่องจากความชื้นในอาหารเลี้ยงเชื้อ จึงส่งผลให้ซัลเฟอร์เข้าไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์โดยการจับกับหมู่ซัลไฮไดรล (Sulphydryl group : -SH) ด้วยพันธะโคเวเลนต์เกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) เอนไซม์จึงไม่สามารถทำงานได้ตามปกติเป็นผลให้เซลล์แบคทีเรียไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณที่พบรัศมีของโซนนยับยั้ง [62]

4.3.9.2 ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ

จากการศึกษาสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตด้วยวิธี Agar disc diffusion โดยใช้เชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) โดยแสดงรัศมีของโซนนยับยั้ง (Inhibition Zone) ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.43



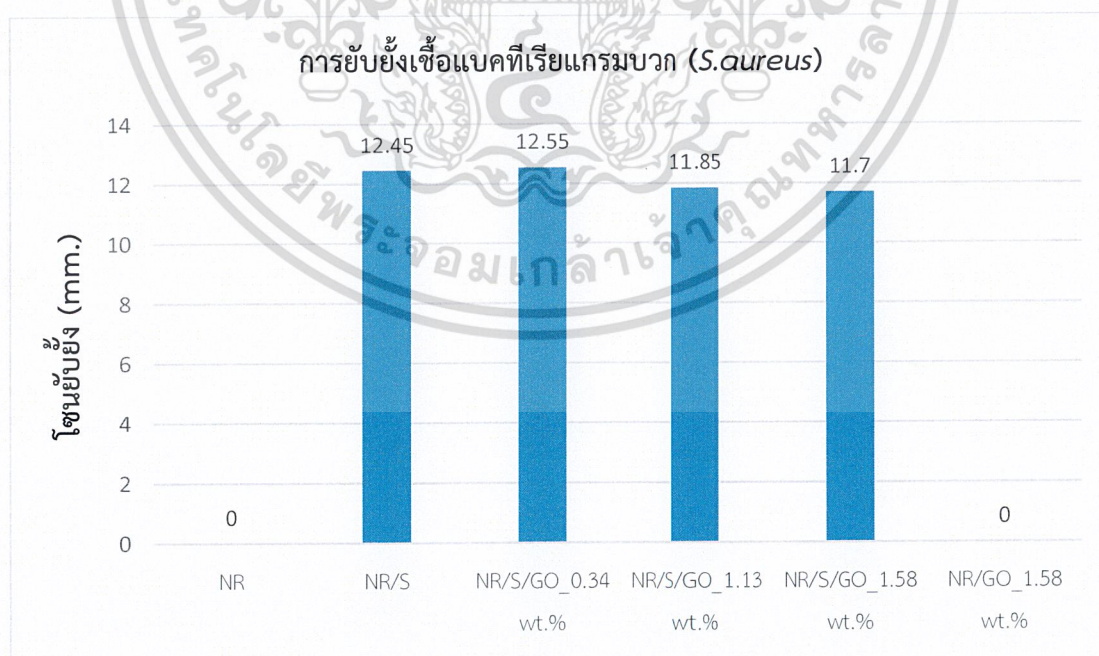
รูปที่ 4.43 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต 6 ประเภท ได้แก่ A) NR Pure, B) NR/S, C) NR/S/GO_0.34 wt%, D) NR/S/GO_1.13 wt%, E) NR/S/GO_1.58 wt% และ F) NR/GO_1.58 wt%

จากรูปที่ 4.43 แสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*S. aureus*) โดยจากผลการทดสอบพบว่าแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตทั้ง 6 ประเภทไม่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบเนื่องจากไม่พบรัศมีของโซนนยับยั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยการวัดรัศมีโซนยับยั้ง (Inhibition Zone)

ประเภทของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต	การวัดซ้ำ	โซนยับยั้ง (mm.)	
		<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>
NR	1	-	-
	2	-	-
NR/S	1	-	12.1
	2	-	12.8
NR/S/GO_0.34 wt%	1	-	12.5
	2	-	12.6
NR/S/GO_1.13 wt%	1	-	12.4
	2	-	11.3
NR/S/GO_1.58 wt%	1	-	11.8
	2	-	11.6
NR/GO_1.58 wt%	1	-	-
	2	-	-



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S.aureus*) โดยแสดงการเปรียบเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าระหว่างแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.44 จะเห็นได้ว่าพบว่าขนาดของโซนนัยยั้งของยางธรรมชาติผสมซิลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนักมีขนาดสูงที่สุด เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมนี้มีการเติมน้ำกลั่นเพื่อทำการปรับปริมาตรเป็นผลให้ความหนืดของสารที่เตรียมได้ต่ำ เป็นผลให้ซิลเฟอร์สามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณขอบได้ ดังที่เห็นในภาพ SEM ว่ามีซิลเฟอร์อยู่ที่ขอบปริมาณมาก จึงเป็นผลให้ซิลเฟอร์สามารถเกิดการแพร่ออกมายังยั้งเชื้อแบคทีเรียบริเวณรอบ ๆ ได้ง่ายกว่า ในขณะที่ที่ปริมาณกราฟีนออกไซด์สูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของสารละลายที่เตรียมได้สูงขึ้น ซิลเฟอร์จึงมีการกระจายตัวที่ตื้นขึ้นเพราะซิลเฟอร์เคลื่อนที่ได้ยากกว่าส่งผลให้ซิลเฟอร์สามารถแพร่ออกไปยังยั้งแบคทีเรียได้น้อยกว่าจึงพบบริเวณโซนนัยยั้งที่มีขนาดเล็กกว่า

จากรูปที่ 4.42, 4.43 และตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าไม่พบโซนนัยยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) ในขณะที่พบโซนนัยยั้งในเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากที่ยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบมีสารลิโปลิแซคคาไรด์ (Lipopolysaccharide) ซึ่งพบเฉพาะในผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบเท่านั้น โดยชั้นนอกสุดของผนังเซลล์ (outer envelope หรือ outer membrane) ของแบคทีเรียแกรมลบมีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากเมมเบรนอื่นๆ ที่พบทั่วไป โดยมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมาก นอกจากนี้ชั้นนอกสุดนั้นยังทำหน้าที่ป้องกันสารเคมีที่เป็นพิษไม่ให้เข้าสู่ภายในเซลล์จึงสามารถป้องกันความเสียหายของเซลล์แบคทีเรียจากสารเคมีต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ได้ [63]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สรุปผลของสารตัวเติมกราฟีนออกไซด์และซิลเฟอร์

กราฟีนออกไซด์ เมื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ในเทคนิค XRD จะขึ้นพีคเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ที่ประมาณ 11 องศา UV-Visible พบพีคเอกลักษณ์การดูดกลืนแสงของกราฟีนที่สำคัญ ได้แก่ O-H Stretching, C=O Stretching, C=C Stretching และ C-O Stretching เทคนิครามานพบพีคเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์คือ D-band ที่ประมาณ 1340 cm^{-1} และ G-band ที่ประมาณ 1565 cm^{-1} SEM พบว่าแผ่นกราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นเกล็ดเล็ก ๆ ซ้อนทับกัน และ TEM พบว่าแผ่นกราฟีนออกไซด์เป็นแผ่นบางและมีขนาดแตกต่างกัน

ซิลเฟอร์ เมื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ในเทคนิค XRD จะพบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 23.1877° , 25.9513° , 26.8271° , 29.0579° และ 31.5164° ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของซิลเฟอร์ เทคนิครามานพบพีคเอกลักษณ์ของซิลเฟอร์ที่ตำแหน่ง 52 cm^{-1} , 83 cm^{-1} , 154 cm^{-1} และ 219 cm^{-1}

5.1.2 สรุปผลของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตและการอบอ่อน

เมื่อเติมซิลเฟอร์และกราฟีนออกไซด์ลงในแผ่นยางธรรมชาติ ในเทคนิค XRD จะพบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เป็นเอกลักษณ์ของซิลเฟอร์และยางธรรมชาติแต่ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เป็นเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์

เทคนิครามาน พบพีคเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์เป็นส่วนใหญ่เพราะกราฟีนออกไซด์มีความว่องไวต่อเทคนิคนี้มากทำให้พีคของกราฟีนออกไซด์บดบังพีคเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติและซิลเฟอร์

เทคนิคเชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในเชิงความร้อน

เทคนิคพิสูจน์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต พบแผ่นกราฟีนออกไซด์หนาแน่นขึ้นตามความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และพบอนุภาคของซิลเฟอร์มีการกระจายตัวที่ขึ้นตามความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นไปจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเนื่องจากกราฟีนออกไซด์เป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งแรงเชิงกลสูง และเมื่อผสมกราฟีนออกไซด์ลงในยางธรรมชาติคอมโพสิตมากขึ้นทำให้อนุภาคซัลเฟอร์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่ (Crosslink) มากขึ้นและพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเนื่องจากซัลเฟอร์เกิดการหลอมรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้การกระจายตัวของซัลเฟอร์ไม่ดี

สมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกคือ *S.aureus* ได้ แต่ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบคือ *E.coli*

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ขั้นตอนการล้างตะกอนกราฟีนออกไซด์ในการเตรียมกราฟีนออกไซด์ ควรล้างตะกอนกราฟีนออกไซด์ให้สะอาดเพื่อป้องกันความเป็นกรดที่ตกค้างในขั้นตอนการสังเคราะห์เนื่องจากกรดจะไปทำลายยางธรรมชาติ
- 2) ขั้นตอนการปั่นกวนสารแขวนลอยยางธรรมชาติควรปรับความเร็วรอบให้เหมาะสมต่อการปั่นกวนเพื่อลดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขณะที่ปั่นกวนเพื่อป้องกันปัญหาฟองในชิ้นงานซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิต
- 3) แม่แบบที่ใช้เตรียมแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตควรมีความสม่ำเสมอเพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดเป็นไปตามมาตรฐาน
- 4) ในการทดลองต่อไปอาจจะมีการพัฒนาปริมาณการเติมกราฟีนออกไซด์ที่มากขึ้นลงในแผ่นยางธรรมชาติคอมโพสิตเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลที่สูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] พงศธร นันทนเนศ และสุนทร ภูรีปรีชาเลิศ 2551. สารและสมบัติของสาร. ม.4 - ม.6. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : อักษรเจริญทัศน์.
- [2] Nitinart Saetung. “Natural Rubber: Application as Starting Materials to Replace the Use of Raw Materials from Petroleum.” Department of Materials Science and technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University.
- [3] เสาวลักษณ์ พงษ์ไพจิตร, วชิรินทร์ รุกขไชยศิริกุล และอรัญ หันพงศ์กิตติกุล. 2558 “การคัดเลือกเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถควบคุมเชื้อราที่ปนเปื้อนบนแผ่นยางพารา.” คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- [4] tesa SE - A Beiersdorf Company. 2016. **ข้อได้เปรียบของยางธรรมชาติ.** [Online]. Available : <https://www.tesa.com/th-th/wikitapia/natural-rubber-properties.html>.
- [5] K. Ounsap, P. Komsan, P. Pothisan. “Studies on the Sulphur loading and annealing temperature effects of natural rubber composite sheets.” Department of Chemistry, Faculty of Science King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
- [6] Harsha Reddy. 2016. **Graphene, graphene oxide chemistry applications.** [Online]. Available : https://www.slideshare.net/khvr/graphene-graphene-oxidechemistryapplications?fbclid=IwAR0koQ_wsyoLMrozNLeVJ_dKpUD9H28H5sNYNGjq3GU59t77J0Nfi7krhH0.
- [7] พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. “สารเคมีสำหรับยาง.” ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [8] Ali Ammar, Abdullah M. Al-Enizi, Mariam ALAli ALMaadeed, Alamgir Karim. 2015. “Influence of graphene oxide on mechanical, morphological, barrier, and electrical properties of polymer membranes.” Arabian Journal of Chemistry. (2016)9 : 274–286.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] นิธินาถ แซ่ตั้ง. 2557. “ยางธรรมชาติ: การประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นทดแทนวัตถุดิบจากปิโตรเคมี.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 19(2)
- [10] วีระชัย แสงฉาย. 2554. “สมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนานาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [11] Kanjaneer Nawamawat, Jitladda T. Sakdapipanich , Chee C. Ho, Yujie Ma, Jing Song, Julius G. Vancso. 2011. “Surface nanostructure of Hevea brasiliensis natural rubber latex particles” Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects. 390 : 157–166
- [12] น.ส.ชนิษฐา หวาเอียด. 2012. ความรู้เกี่ยวกับน้ำยาง. [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/stu554236002/me-nu-dan-khang1>
- [13] Yamuna Beraheng. 2017. รูปแบบของยางธรรมชาติ. [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/5820310099m/rup-baeb-khxng-yang-thrmchati-1>
- [14] Yamuna Beraheng. 2017. โครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ. [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/5820310099m/khongsrang-hlak>
- [15] สถาบันพลาสติก. 2557. โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์และเครื่องมือแพทย์. กรุงเทพฯ
- [16] วิกิพีเดีย. 2019. กำมะถัน. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%81%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B8%96%E0%B8%B1%E0%B8%99>
- [17] Jutarut_DPM. (นามแฝง). 2012. “ซัลเฟอร์ (กำมะถัน) สารเคมีที่ควรรู้จัก.” ใน ภัยจากสารเคมี. กรุงเทพฯ : ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ
- [18] ภาพผลึกกำมะถัน. 2011. [Online]. Available : <https://pixabay.com/th/photos/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%A2-%E0%B8%AB%E0%B8%B4%E0%B8%99-%E0%B8%81%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B8%96%E0%B8%B1%E0%B8%99-%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B1%E0%B8%A5-7941/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] toppr. 2019. **Sulphur – Allotropic Forms**. [Online]. Available :
<https://www.toppr.com/guides/chemistry/the-p-block-elements/sulphur-allotropic-forms/>
- [20] Elizabeth Reynolds. 2018. **Sulphur**. [Online]. Available :
<https://slideplayer.com/slide/12962972/>
- [21] Shikhar Lakhumna. 2019. **Sulphur: Allotropic Forms**. [Online]. Available :
<https://www.askiitians.com/iit-jee-s-and-p-block-elements/sulphur-allotropic-forms/>
- [22] Guru by Topeng. 2016. **รูปของกำมะถัน**. [Online]. Available :
<https://sites.google.com/site/topengpjack/reiyn-khemi-xxnlin/khxngkhaeng-khxng-hlw-kaes/rup-khxng-kamathan>
- [23] Chemistry LibreTexts. 2015. **รูปของกำมะถัน**. [Online]. Available :
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Supplemental_Modules_\(Inorganic_Chemistry\)/Descriptive_Chemistry/Elements_Organized_by_Block/2_p-Block_Elements/Group_16%3A_The_Oxygen_Family_\(The_Chalcogens\)/Z%3D016_Chemistry_of_Sulfur_\(Z%3D16\)](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Supplemental_Modules_(Inorganic_Chemistry)/Descriptive_Chemistry/Elements_Organized_by_Block/2_p-Block_Elements/Group_16%3A_The_Oxygen_Family_(The_Chalcogens)/Z%3D016_Chemistry_of_Sulfur_(Z%3D16))
- [24] Royal Society of Chemistry. 2019. **Periodic table of Sulfur**. [Online]. Available : <http://www.rsc.org/periodic-table/element/16/sulfur>
- [25] Flavio Pendolino and Nerina Armata. 2017. **Graphene Oxide in Environmental Remediation Process**. Italy : Springer Nature
- [26] Wordpress. 2014. **Definitions: What is Graphene Oxide, anyways?** [Online]. Available : <https://hypermarkgo.wordpress.com/2014/04/06/9/>
- [27] Sekhar C. Ray 2015. **Applications of Graphene and Graphene-Oxide Based Nanomaterials**. South Africa. : University of South Africa.
- [28] Education Co.,Ltd. 2016. **แบคทีเรีย**. [Online]. Available :
http://www.digitalschool.club/digitalschool/science1_2_2/science9_1/more/bacteria_4.php

[29] ดร. รัชชัย สุ่มประดิษฐ์. 2555. ความหลากหลายของจุลินทรีย์. [สไลด์]. พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร

[30] Hanaa M. Hegab, Ahmed ElMekawy, Linda Zou, Dennis Mulcahy, Christopher P. Saint, Milena Ginic-Markovic. 2016. “The controversial antibacterial activity of graphene-based materials.” *Carbon*. 105 : 362-376.

[31] Chemical lesson. 2015. โครงสร้างเคมีและสมบัติของพอลิเมอร์. [Online]. Available : http://119.46.166.126/self_all/selfaccess10/m4/chemical4_1/lesson5/item3_1.html

[32] M. Hamza Al-Maamori, A. Fadhil Hamza, A. Ehsan. 2018. “Effect of sulfur and Nano- carbon black on the mechanical properties of hard rubber.” *Journal of University of Babylon, Engineering Sciences*. 26(2) : 127-134.

[33] L. Yi, J. Zhang, J. Yang, F. Sun, H. Zhang, L. Zhao. 2018. “Effect of annealing induced crystalline evolution on the scratch resistance of polylactide.” *Tribology International*. 128 : 328–336.

[34] Z. Tang , X. Liu, Y. Hu, X. Zhang and B. Guo. 2017. “A slurry compounding route to disperse graphene oxide in rubber.” *Materials Letters*. 191 : 93-96.

[35] L. Zhenga, D. Wangb, Z. Xua, L. Zhanga, L. Liua, S. Wena. 2019. “High barrier properties against sulfur mustard of graphene oxide/butyl rubber composites.” *Composites Science and Technology*. 170. : 141–147.

[36] D.C. Stanier, A.J. Patil, C. Sriwong, S.S. Rahatekar, J. Ciambella. 2014. “The reinforcement effect of exfoliated graphene oxide nanoplatelets on the mechanical and viscoelastic properties of natural rubber.” *Composites Science and Technology*. 95 : 59–66.

[37] กนกวรรณ อุ้นทรัพย์, พวงทอง คมสันต์และแพรวนภา โพธิสาร. 2017. “การศึกษาผลของการเติมกำมะถันและอนุหภูมิการอบอ่อนของแผ่นยางธรรมชาติผสม.” *ปริญญาวิทยาสาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ-*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตไ้หนาไปเซประเษยนดานการค้ำ
จอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [38] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. 2016. “ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์.” กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 63(197) : 38-40.
- [39] ศุภฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้. 2012. “ทำไมต้องมีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray Diffraction.” ห้องปฏิบัติการเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ MTEC. : 12-18.
- [40] SciSpec Co., Ltd. 2017. **HANDHELD FTIR SPECTROMETER.** [Online]. Available : <http://www.scispec.co.th/FTIR.html>
- [41] Material characterization ห้องปฏิบัติการสเปกโตรสโคปี. 2001. “เทคนิคทางรามาน Raman spectroscopy.” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ MTEC. : 60-63.
- [42] นายศรารุท แสงอุไร. 2005. **เทคนิคปฏิบัติการใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในการวิเคราะห์ทางเคมี.** [Online]. Available : <http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm>.
- [43] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC). 2019. **Thermogravimetric Analysis (TGA).** [Online]. Available : https://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=569.
- [44] อัจฉราพร ศรีอ่อน. 2016. “หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง.” ห้องปฏิบัติการวัสดุทางการแพทย์ หน่วยวิจัยวิศวกรรมชีวการแพทย์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ MTEC. : 77-80.
- [45] วันวิสาข์ ธรรมานนท์ และดวงกมล อัสวมาต. 2002. “การใช้เทคนิควิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์เพื่อศึกษาภาชนะดินเผาโบราณจากแหล่งเตาเผาบ้านดี จังหวัดปัตตานี.” มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [46] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล. 2004. **นาโนเทคโนโลยี.** [Online]. Available : <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano /Page/Unit4-5.html>
- [47] ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2012. **OPTICAL MICROSCOPE (OM).** [Online]. Available : http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [48] รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ คณะพลังงาน สิ่ง แวดล้อมและวัสดุ (มจร.) “การทดสอบสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์.” เอกสารประกอบการสอน วิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis.
- [49] Miss Chonticha Chinda. “Preparation of PBS/PLA blown film for active film.” Engineering Program in Polymer Science and Engineering Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2013.
- [50] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2017. X-Ray Diffractometer (XRD) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. [Online]. Available : <https://www.sri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>
- [51] Jinrong Wu, Wang Xing, Guangsu Huang, Hui Li, Maozhu Tang, Siduo Wu, Yufeng Liu. 2013. “Vulcanization kinetics of graphene/natural rubber nanocomposites.” *Polymer*. 54 : 3314-3323.
- [52] Cherian R.S., S. Sandeman, S. Ray, I.N. Savina, Ashtami J., Mohanan P.V. 2019. “Green synthesis of Pluronic stabilized reduced graphene oxide: Chemical and biological characterization.” *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*.
- [53] Lei Zhang, Yi He, Shuangwei Feng, Ling Zhang, Lei Zhang, Zhiling Jiao, Yingqing Zhan and Yajie Wang. 2015. “Preparation and Tribological properties of novel Boehmite/Graphene Oxide nano-hybrid.” *Ceramics International*.
- [54] MU Shi-Jia, SU Yu-Chang, XIAO Li-Hua, LIU Si-Dong, HU Te, TANG Hong-Bo. 2013. “X-Ray Diffraction Pattern of Graphite Oxide.” *CHIN. PHYS. LETT.* 30(9) 096101.
- [55] L. Gao, L. Wang, L. Yang, et al., 2019. “Preparation, characterization and antibacterial activity of silver nanoparticle/graphene oxide/diatomite composite.” *Applied Surface Science*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [56] Sitansu Sekhar Nanda, Dong Kee Yi, Kwangmeyung Kim. 2016. “Study of antibacterial mechanism of graphene oxide using Raman spectroscopy.” Scientific Reports.
- [57] RRUFF. 2015. XRD Pattern of Sulphur. [Online]. Available : <http://rruff.info/sulphur/display=default/R050006>
- [58] Shiv Shankar, Rudra Pangen, Jin Woo Park, Jong-Whan Rhim. “Preparation of sulfur nanoparticles and their antibacterial activity and cytotoxic effect.” Materials Science & Engineering C. (2018) : 508-517.
- [59] Xiong Xian-qing, Bao Yu-liang, Liu Hui, Zhu Qingqing, Lu Rong, Miyakoshi Tetsuo. 2018. “Study on Mechanical and Electrical Properties of Cellulose Nanofibrils /Graphene-Modified Natural Rubber.” Materials Chemistry and Physics.
- [60] A. R. R. Menon, C. K. S. Pillai and G. B. Nandob. 1996. “Thermal degradation characteristics of natural rubber vulcanizates modified with phosphorylated cashew nut shell liquid.” Polymer Degradation and Stability. 52 : 265-271.
- [61] Chegg Study. 2013. The Phase Diagram For Sulfur. [Online]. Available : <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/phase-diagram-sulfur-solid-sulfur-exist-two-different-crystal-structures-monoclinic-rhombic-q19608854?fbclid=IwAR0OSTYwbVpVnKdWzuOdlMeu-2zoGGdnpq3kQVeDfZthYt8ORruKiYkjP6o>
- [62] Leon Libenson, Faith P. Hadley, Alice P. Mcilroy, Verna M. Wetzel and Ralph R. Mellon. 1953. “Antibacterial effect of elemental Sulfur.” The Journal of Infectious Diseases. 93(1) : 28-35
- [63] Food Network Solution Co., Ltd. 2010-2019. ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4077/cell-wall-%E0%B8%9C%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A5%E0%B8%A5%E0%B9%8C>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การหาน้ำหนักของแผ่นยางธรรมชาติ

เทน้ำหนักน้ำยางธรรมชาติลงในบีกเกอร์ปริมาตร 7 มิลลิลิตร และปล่อยให้แห้งจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก (น้ำหนักเนื้อยางธรรมชาติ)

จำนวนครั้ง	น้ำหนักของแผ่นยางธรรมชาติ (กรัม)
1	3.9032
2	4.0363
3	4.0350
เฉลี่ย	3.9915

การหาความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ (GO)

ปีเปตสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ 1 มิลลิลิตร และนำไปอบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนสารแห้ง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก

จำนวนครั้ง	น้ำหนักของกราฟีนออกไซด์ (กรัม)
1	0.0075
2	0.0078
3	0.0078
เฉลี่ย	0.0077

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งนี้ข้อมูลเป็นข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลจริงเป็นข้อมูลเอกสารหลักซึ่งมีการนำไปใช้
ความเข้มข้นของสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์เท่ากับ 7.7 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

การคำนวณปริมาณสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปใแผ่นยางธรรมชาติ

น้ำหนักของสารเคมี

สารเคมี	ปริมาตร (mL)	น้ำหนัก (g.)
น้ำยางธรรมชาติ	7.00	2.9877
สารแขวนลอยซัลเฟอร์	0.42	0.3773
สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์	1.50	0.0116
	3.00	0.0231
	5.00	0.0385
	7.00	0.0539

• ความเข้มข้นร้อยละโดยมวล

ยกตัวอย่าง การหาความเข้มข้นร้อยละโดยน้ำหนักของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต โดยใช้สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ปริมาตร 7 มิลลิลิตร น้ำหนักรวมของสารในแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต คิดเป็น 100% คือ

น้ำยางธรรมชาติ	2.9877 กรัม	
		+
สารแขวนลอยซัลเฟอร์	0.3773 กรัม	
		+
สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์	0.0539 กรัม	
น้ำหนักรวม	3.4189 กรัม	

$$\text{ร้อยละโดยมวล} = \frac{\text{มวลตัวถูกละลาย}}{\text{มวลของสารละลาย}} \times 100$$

แทนค่าลงในสูตร จะได้ ร้อยละโดยมวล = $\frac{0.0539 \text{ กรัม}}{3.4189 \text{ กรัม}} \times 100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความเข้มข้น Parts per hundred of rubber (phr)

ยกตัวอย่าง การหาความเข้มข้นร้อยละโดยน้ำหนักของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ คอมโพสิต โดยใส่สารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ปริมาตร 7 มิลลิลิตร

จะใส่สารเคมีที่ใช้เทียบกับยางธรรมชาติ 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก)

$$phr = \frac{\text{น้ำหนักสารตัวเติม}}{\text{น้ำหนักยางธรรมชาติ}}$$

แทนค่าลงในสูตร จะได้ $phr = \frac{0.0539 \text{ กรัม}}{2.9877 \text{ กรัม}}$

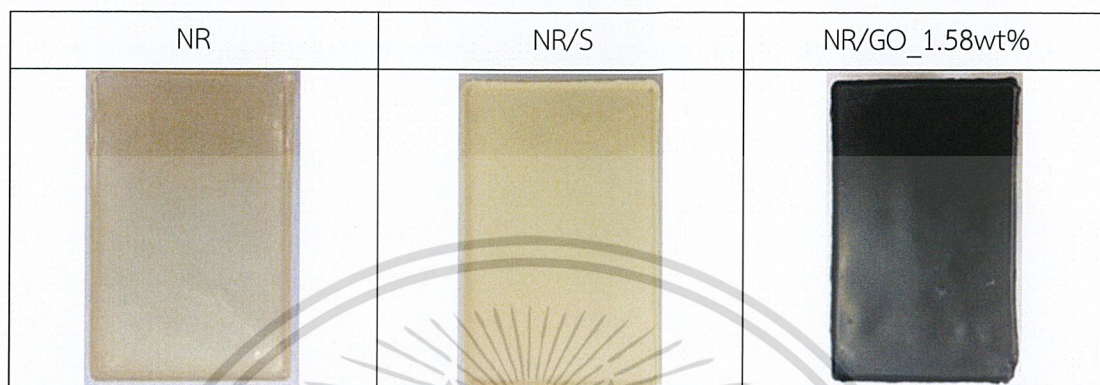
$$phr = 0.0180 \text{ phr}$$



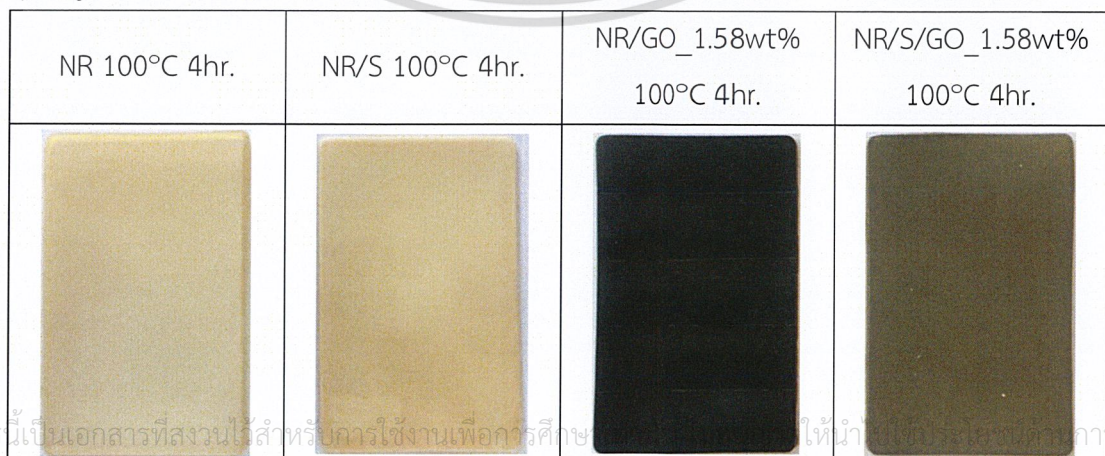
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 รูปแผ่นยางธรรมชาติ, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต, แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตและแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิต



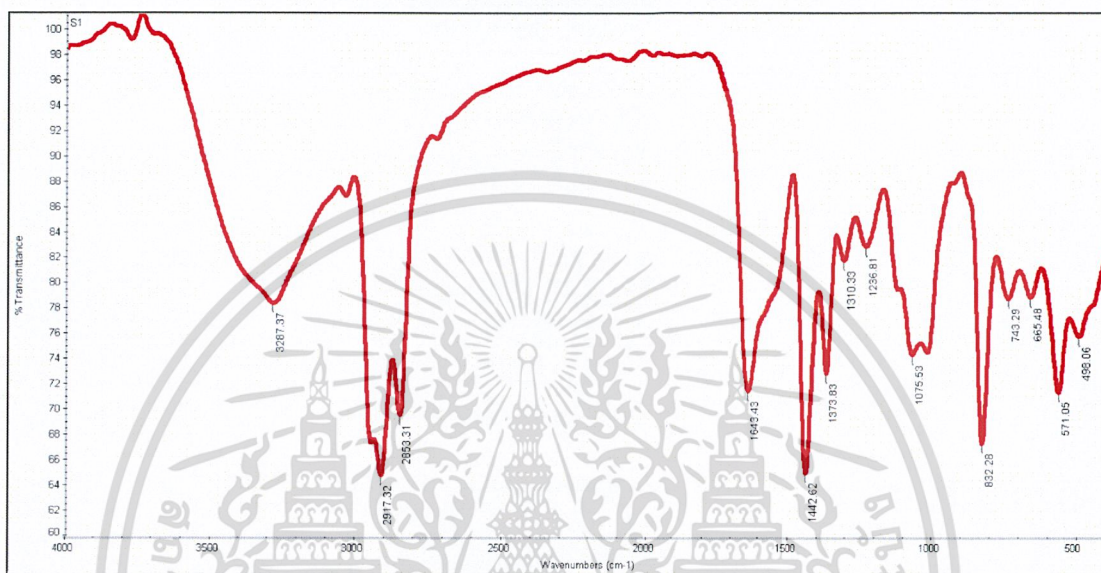
ตารางที่ ข.2 รูปแผ่นยางธรรมชาติ, แผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์คอมโพสิต, แผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตและแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



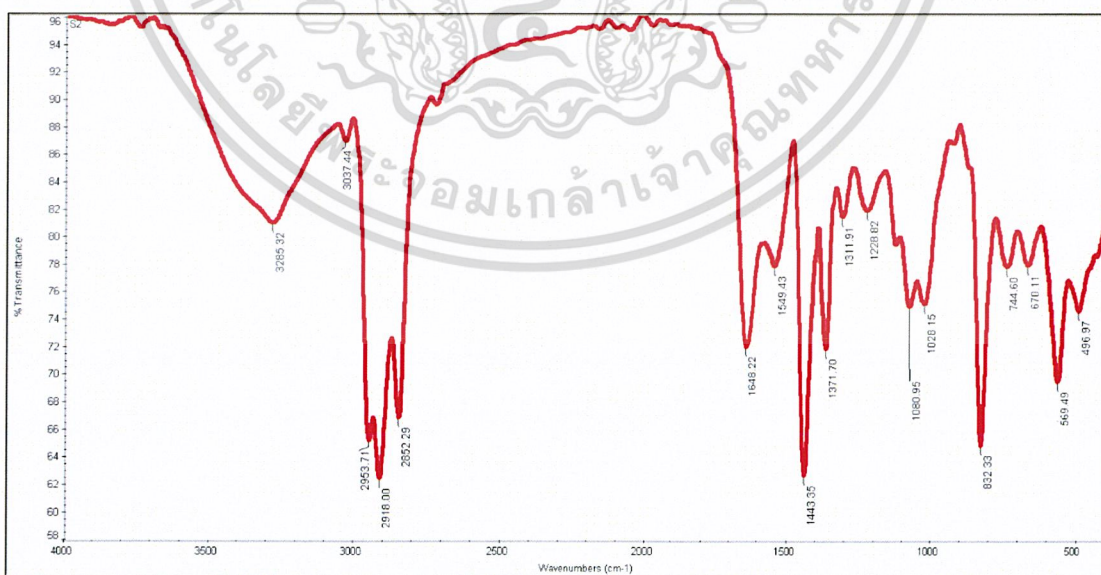
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษานำไปใช้ประโยชน์ตามการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของโมเลกุล ด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR)

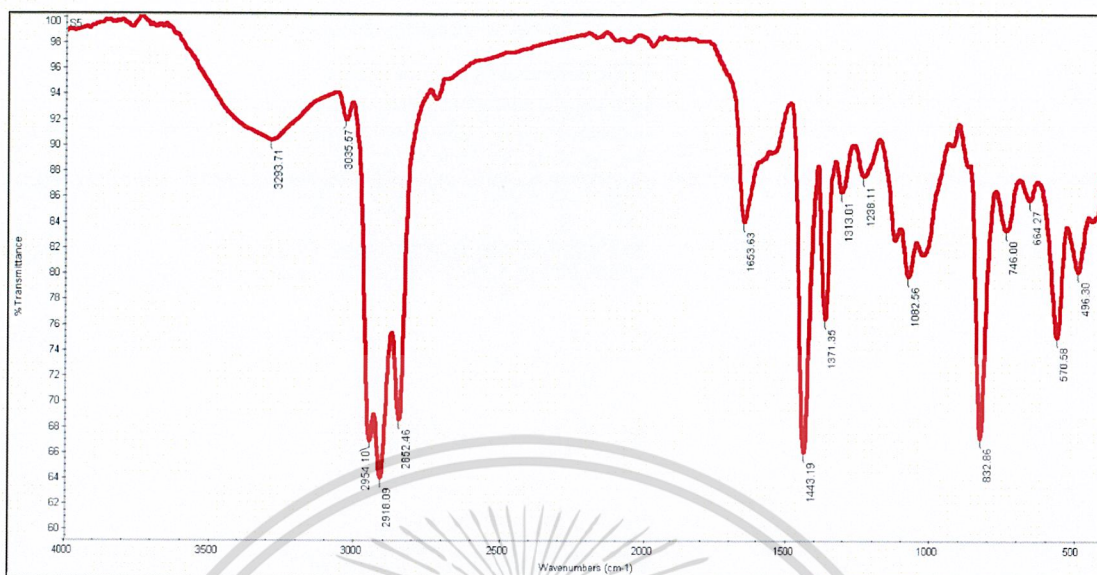


รูปที่ ค.1 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ (NR)

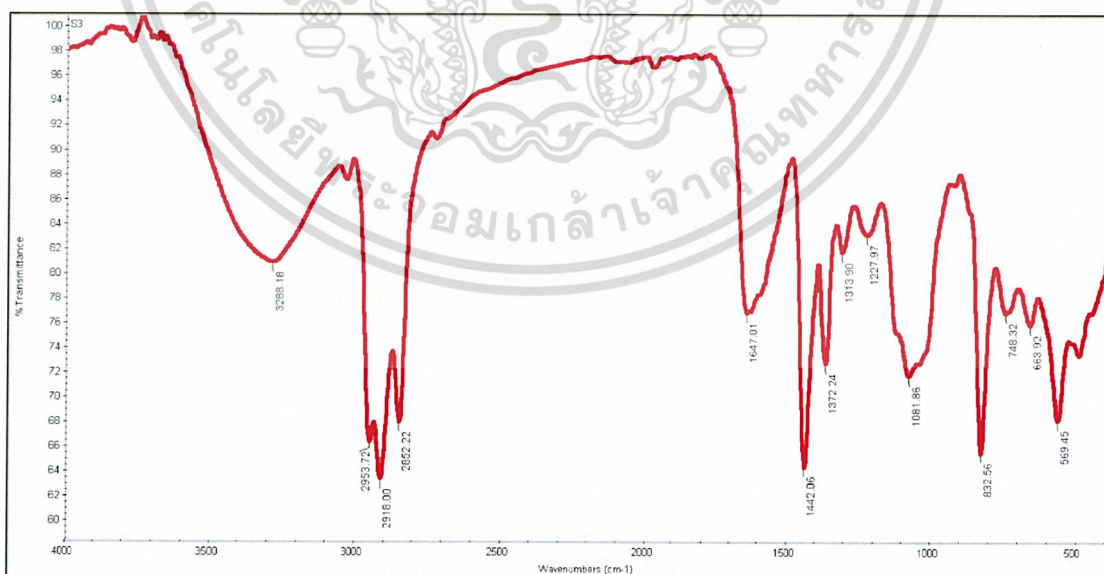


รูปที่ ค.2 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์คอมโพสิต (NR/S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

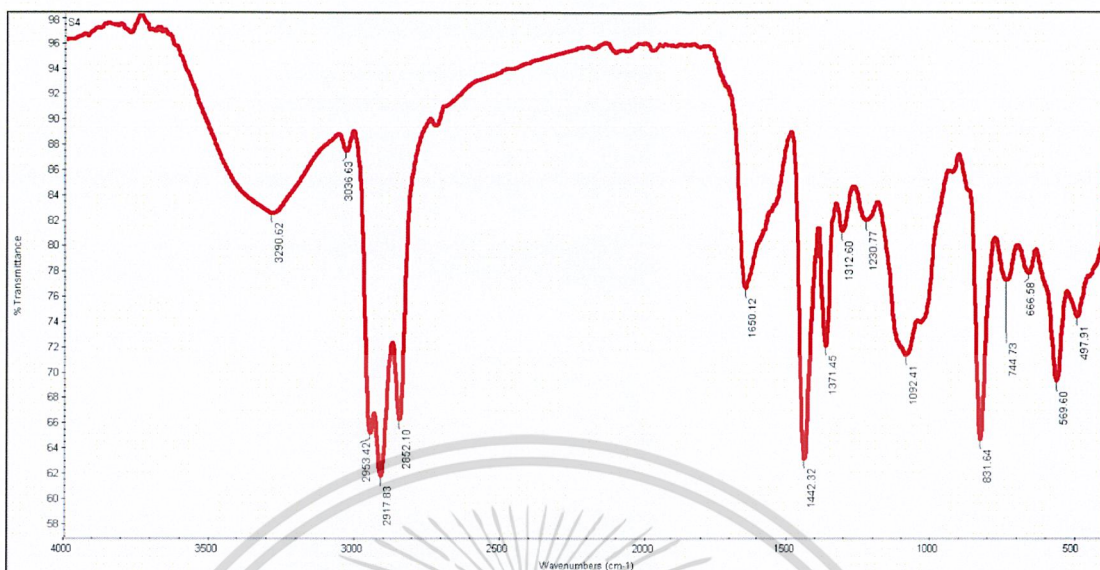


รูปที่ ค.3 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนัก คอมโพสิต (NR/GO_1.58 wt%)



รูปที่ ค.4 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซัลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยน้ำหนักคอมโพสิต (NR/S/GO_0.34 wt%) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

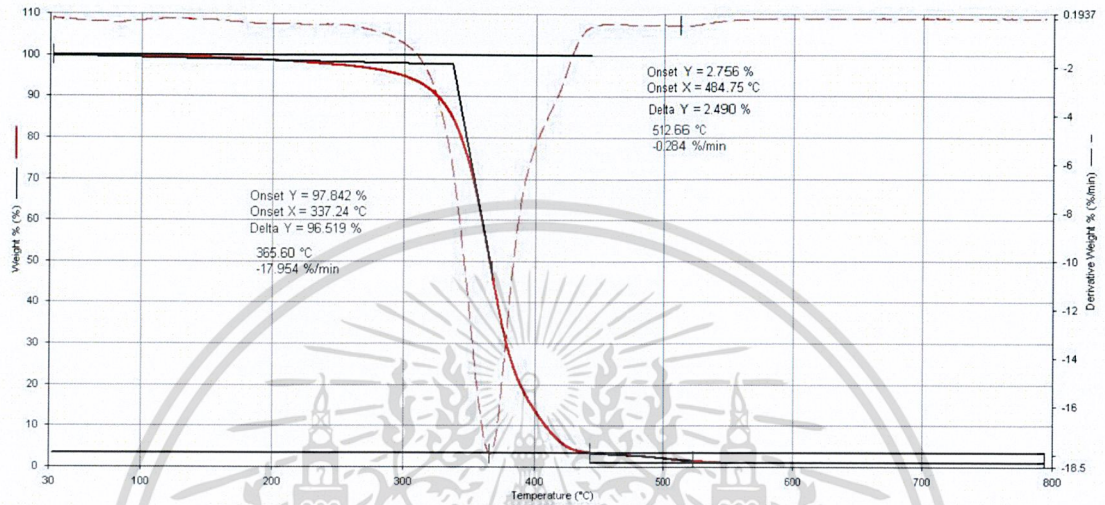


รูปที่ ค.5 แสดงกราฟ FT-IR ของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.58
โดยน้ำหนักคอมโพสิต (NR/S/GO_1.58 wt%)

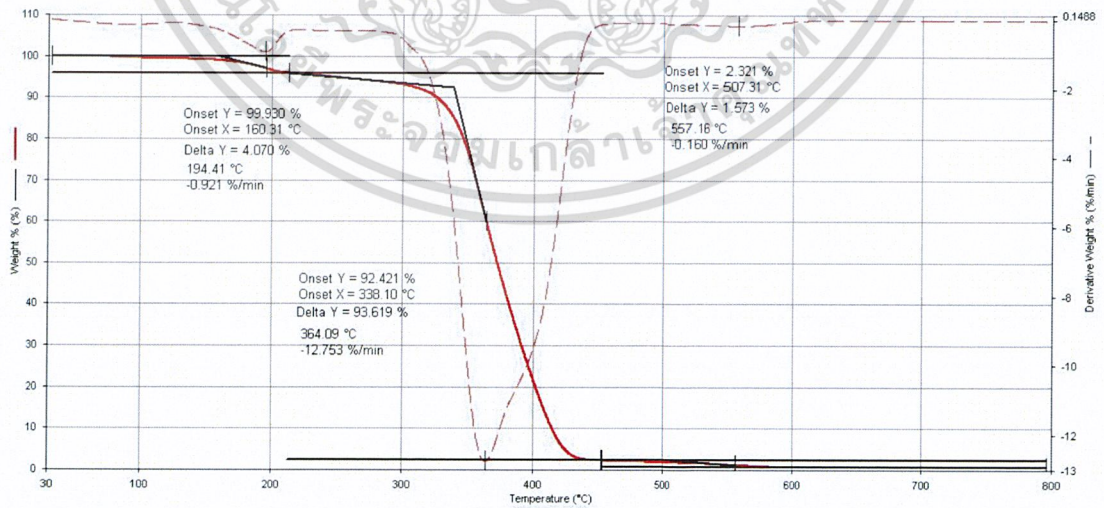
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์เทคนิคเชิงความร้อน ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis

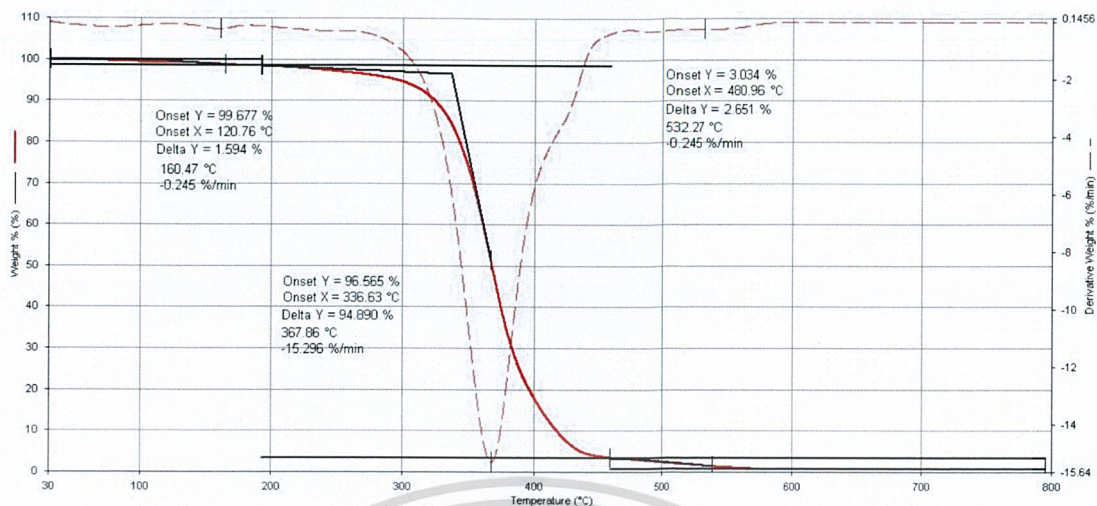


รูป ง.1 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ (NR)

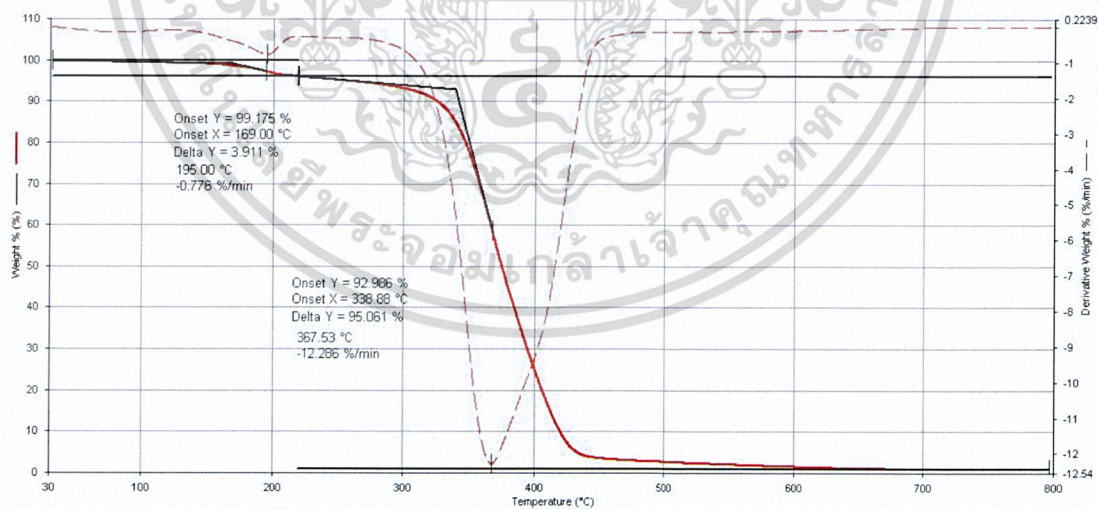


รูป ง.2 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์คอมโพสิต (NR/S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

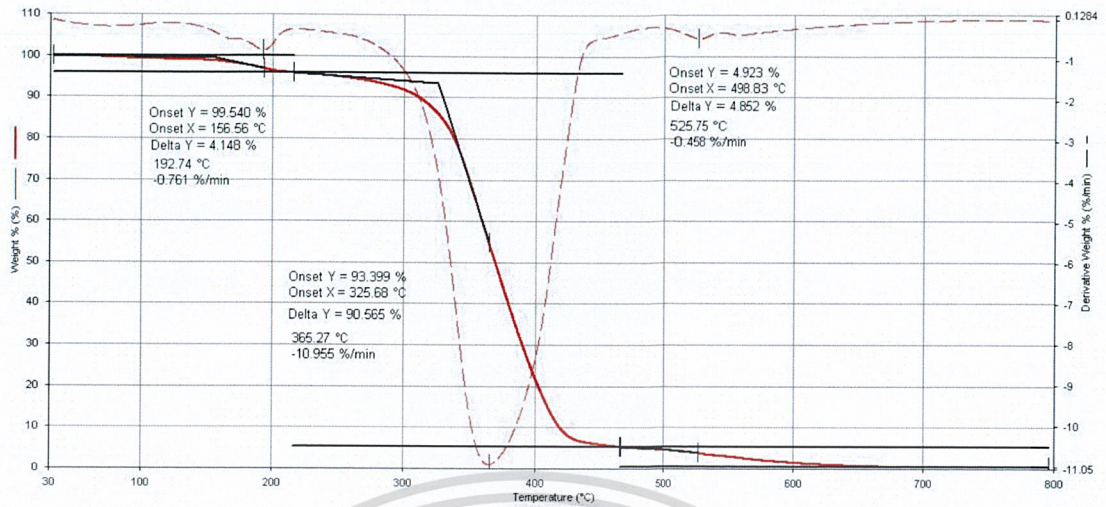


รูป ง.3 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ/กราฟีนออกไซด์ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักคอมโพสิต (NR/GO_1.58 wt%)



รูป ง.4 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนักคอมโพสิต (NR/S/GO_0.34 wt%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ง.5 แสดงกราฟการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแผ่นยางธรรมชาติ/ซิลเฟอร์/กราฟีนออกไซด์ ร้อยละ 1.58 โดยน้ำหนักคอมโพสิต (NR/S/GO_1.58 wt%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้